



---

TESIS - SF 092006

**RANCANG BANGUN BALING-BALING KINCIR ANGIN  
MENGUNAKAN NACA 4412 DAN 4415 DARI BAHAN  
KAYU MAHONI (*Swietenia macrophylla*) DAN PINUS  
(*Pinus merkusii*)**

Burhannudin Dahlan  
NRP.1113201039

Dosen Pembimbing  
Endarko, M.Si, Ph.D.

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN FISIKA INSTRUMENTASI  
JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2016



---

TESIS - SF 092006

**DESIGN OF WIND TURBINE BASED ON THE NACA 4412  
AND 4415 USING MAHOGANY (*Swietenia  
macrophylla*) DAN PINES WOOD (*Pinus merkusii*)**

Burhannudin Dahlan  
NRP.1113201039

Supervisor  
Endarko, M.Si, Ph.D.

MAGISTER PROGRAM  
STUDY ON INSTRUMENTATION  
DEPERTEMEN OF PHYSICS  
FACULTY OF MATHEMATICS AND NATURAL SCIENCES  
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
SURABAYA  
2016

Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Sains (M.Si)

di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

Burhannudin dahlan  
NRP. 1113201039

Tanggal Ujian : 13 Januari 2016  
Periode Wisuda : Maret 2016

Disetujui oleh:



1. Endarko, M.Si, Ph. D.  
NIP. 19741117 199903.1.001

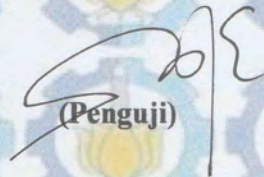
(Pembimbing)



2. Dr. Melania S. Muntini, MT  
NIP. 19641229 199002.2.001

(Penguji)

3. Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng  
NIP. 19690904 199203.1.003



(Penguji)

Direktur Program Pascasarjana



Prof. Ir. Drahuar Manfaat, M.Sc, Ph.D  
NIP. 19601202 198701 1 001



# RANCANG BANGUN BALING-BALING KINCIR ANGIN MENGUNAKAN NACA 4412 DAN 4415 DARI BAHAN KAYU MAHONI (*Swietenia macrophylla*) DAN PINUS (*Pinus merkusii*)

Nama : Burhannudin Dahlan  
NRP : 1113201039  
Pembimbing : Endarko, M.Si, Ph.D..

## ABSTRAK

Telah dibuat design bilah kincir angin dengan menggunakan program QBlade v.09 yang berbasis pada, airfoil NACA 4412 dan 4415 dengan dua tipe taper dan taperless. Bahan dasar pembuatan bilah berasal dari kayu Mahoni (*Swietenia macrophylla*) dan kayu Pinus (*Pinus merkusii*). Penelitian ini bertujuan mencari jenis airfoil NACA yang terbaik untuk kecepatan angin 1 – 12 m/s yang diharapkan dapat meningkatkan daya kincir angin serta memanfaatkan kayu sebagai bahan dasar pembuatan bilah. Penelitian dilakukan dalam tiga tahap yaitu Perancangan bilah dilakukan secara simulasi untuk NACA 4412 dan 4415 dengan jenis bilah taper dan taperless. Pembuatan bilah hasil simulasi dilakukan dengan menggunakan mesin CNC. Proses pengujian bilah dilakukan secara langsung pada turbin kincir angin yang terdapat di Lentera Angin Nusantara.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa NACA 4412 lebih baik dari pada NACA 4415, sedangkan untuk NACA 4412 jenis taperless lebih baik dari pada jenis taper pada simulasi pengujian Cp-TSR untuk TSR 7 taperless bernilai Cp 52% dan taper bernilai Cp 50%. Sementara itu hasil simulasi daya-kecepatan angin dengan kecepatan angin 12 m/s taperless memiliki daya 1549.88 W dan taper memiliki daya 1235.31 W. Pada penelitian ini bilah dibuat dengan desain bilah jenis taperless airfoil NACA 4412 berbahan kayu Mahoni (*Swietenia macrophylla*) dan kayu Pinus (*Pinus merkusii*). Hasil pengujian ketahanan untuk kayu Mahoni menunjukkan keretakan pada salah satu bilah sedangkan untuk kayu Pinus tidak terjadi keretakan pada semua bilah. Selanjutnya untuk pengujian daya bilah kayu mahoni memiliki Matching Ratio untuk hari pertama sebesar 32.42%, hari kedua bernilai 30.28% dan pada hari ketiga bernilai 88.87%. Sementara itu untuk kayu mahoni Matching Ratio di hari pertama sebesar 36.97%, 14.78% pada hari kedua dan pada hari ketiga bernilai 35.84%.

**Kata kunci:** *Small Wind Turbin, NACA 4412, NACA 4415, Desain Bilah, Kayu*



# DESIGN OF WIND TURBINE BASED ON THE NACA 4412 AND 4415 USING MAHOGANY (*Swietenia macrophylla*) AND PINES WOOD (*Pinus merkusii*)

Student's name : Burhannudin dahlan  
Student's ID : 11132010539  
Supervisor : Endarko, M.Si, Ph.D

## ABSTRACT

Design of wind turbine blades have been successfully done with a QBlade v0.9 using a NACA airfoil 4412 and 4415 for both types of taper and taperless. Furthermore, the designed blades have been fabricated using Mahogany (*Swietenia macrophylla*) and Pines wood (*Pinus Merkussi*). The purpose study was to determine the best type of NACA airfoil for designing blades at wind speeds ranging from 1 – 12 m/s using Mahogany and Pines, and was then to increase the power of windmills. The study was conducted in three phases, namely design of the blades was performed by simulation using Qblade v0.9 for designing the NACA 4412 and 4415 with both types of taper and taperless. Hereinafter, the fabrication of the designed NACA 4412 and 4415 using CNC machine. The final phase was the examination of fabricated blades using a windwill which is located at the LAN (Lentera Angin Nusantara).

The results showed that the NACA 4412 is better than the NACA 4415 whereas for the NACA 4412 type, the taperless type showed the best result for simulation test of Cp-TSR (TSR 7) which achieved at Cp 52% compared to taper with Cp 50%. Meanwhile, power-speed simulation at a speed of 12 m/s the taperless type showed better than taper type with power value at 1549.88 and 1235.31 W, respectively. Crack testing to determine the durability of the blades have been done directly with the installation of the wind turbines in the Lentera Angin Nusantara (LAN) and the result showed that the blades made from Pines wood is stronger than the blades made from Mahogany. Moreover, the matching ratio for determining percentage of obtained power divided by theoretical power has been carried out for three days. Measurement matching ratio for three days for the blades (Pines wood) resulted in 32.42% for the first day, 30.28% for the second day and 88.87% for third day. Meanwhile, the blades (Mahogany) were produced the matching ratio around 36.97% (the first day), 14.78% (the second day) and 35.84% (the third day).

Keywords: *Small Wind Turbin, NACA 4412, NACA 4415, Blade design, Mahogany, Pines Wood*



## Kata Pengantar

Syukur Alhamdulillah Robbil 'Alamiin, seala puji bagi ALLAH SWT yang telah melimpahkan kenikmatan lahir dan batin sehingga penulis dapat menyelesaikan studi S2 dan dapat menyelesaikan tesis dengan judul : **RANCANG BANGUN BALING-BALING KINCIR ANGIN MENGGUNAKAN NACA 4412 DAN 4415 DARI BAHAN KAYU MAHONI (*Swietenia macrophylla*) DAN PINUS (*Pinus Merkusii*).**

Tesis ini merupakan hasil penelitian sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Sains (M.Si) pada Program Studi Magister jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Institut Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis menyadari bahwa tesis ini dapat diselesaikan dengan baik atas bimbingan dan arahan, dan dorongan moral maupun bantuan materil dari berbagai pihak. Untuk itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Abdul Ghofar dan Ibu Margisah yang telah membesarkan dan mendidik penulis dengan kesabaran dan pengorbanan yang tak terbalasakan serta mendoakan dengan tulus dan penuh kasih sayang.
2. Bapak Endarko M.Si, Ph.D, selaku pembimbing yang telah membimbing dan mengarahkan dengan penuh kesabaran dan kasih sayang dalam menyelesaikan tesis.
3. Bapak Dr. Yono Hadi Promono, M.Eng. dan Ibu Dr. Melania S. Muntini, MT, selaku penguji yang telah memberikan masukan dan saran dalam merivisi tesis ini.
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Eddy Yahya, M.Sc., selaku coordinator Program Studi Magister Jurusan Fisika FMIPA ITS Surabaya.
5. Bapak Dr. Yono Hadi Promono, M.Eng., selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA ITS Surabaya.



6. Seluruh staf pengajar yang telah Menularkan ilmunya, staf administrasi, staf laboratorium dan staf ruang baca Jurusan Fisika FMIPA ITS Surabaya yang telah memberikan pelayanan dengan baik.
7. Bapak Ricky Elson selaku direktur Lentera Angin Nusantara yang telah banyak memberikan masukan dan saran selama proses penelitian serta memberikan izin untuk menggunakan perlengkapan LAN selama berada di Lentera Angin Nusantara.
8. Segenap teman-teman Lentera Angin Nusantara, Abang Kinoy, Abang Herson, Abang Kak Piala, Kak Grace, Kak Uun yang telah banyak memberikan pengetahuan dan ketrampilan dalam menjalani hidup selama berada di Lentera Angin Nusantara.
9. Rekan-rekan KP Indramayu, KP Politek Caltex Riau dan segenap teman-teman Di Lentera Angin Nusantara selama masa penelitian telah banyak membantu menyelesaikan tesis.
10. Segenap rekan-rekan seperjuangan di Perumdos W-5 Abang Tobi, Abang Richard, Abang Jeffri, Abang Saiful dan Abang Rahmat yang telah mengisi hari-hari penulis selama berada di Surabaya
11. Segenap teman-teman mahasiswa Pra S2 dan S2 atas segala kebersamaan, dukungan dan semangatnya.
12. Tersepesial buat kekasihku Elsy Sujadi yang telah banyak mensupport dan memberikan semangat dan kasih sayang yang tak henti-hentinya dalam perjuangan menempuh studi S2.
13. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu, penulis mohon maaf menyampaikan banyak terima kasih atas bantuannya.

Tentunya penulisan tesis ini masih banyak kekurangan dan ketidaksempurnaan, maka saran dan kritik yang membangun dari pembaca penulis harapkan demi penyempurnaan lebih lanjut. Semoga tesis ini dapat memberikan manfaat untuk menambah wawasan keilmuan dan mendapat ridho dari ALLAH SWT. Amin

Surabaya, Januari 2016

Penulis



## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>v</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>vi</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xi</b>
 <b>BAB 1 PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Tujuan Penelitian .....	4
1.5 Manfaat penelitian .....	4
 <b>BAB 2 KAJIAN PUSTAKA</b>	
2.1 Defini Energi Angin .....	5
2.2 Teori Kincir Angin .....	6
2.3 Wind Turbine.....	8
2.3.1 HAWT ( <i>Horizontal Axis Wind Turbine</i> ).....	8
2.3.2 VAWT ( <i>Vertical Axis Wind Turbine</i> ) .....	9
2.3.3 Komponen Utama Wind Turbine .....	10
2.3.4 Gaya-gaya Yang Mempengaruhi Wind Turbine .....	11
2.4 Teori HAWT Desain Bilah.....	14
2.4.1 TSR ( <i>Tip Speed Ratio</i> ) .....	14
2.4.2 Perancangan Bentuk dan Jumlah Bilah.....	15
2.4.3 Profil Airfoil .....	16
2.4.4 Analisi Elemen Bilah .....	19



2.4.5	Teori Elemen Bilah .....	21
2.5	Perancangan Bilah .....	22
2.6	Kayu.....	24
2.6.1	Sifat Fisik Kayu.....	25
2.6.2	Sifat Mekanik Kayu .....	25
2.7	Kayu Mahoni ( <i>Swietenia macrophylla</i> ).....	26
2.8	Kayu Pinus ( <i>Pinus Merkussi</i> ) .....	27
<b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN</b>		
3.1	Tahap-tahap Penelitian .....	29
3.2	Alat dan Bahan .....	29
3.3	Prosedur Kerja .....	30
3.3.1	Perancangan Bilah.....	30
3.3.2	Pembuatan Bilah Hasil Simulasi .....	31
3.3.3	Pengujian Bilah .....	32
3.4	Analisis Data.....	32
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN</b>		
4.1	Penentuan Awal Parameter bilah.....	35
4.2	Penentuan Geometri Bilah.....	36
4.3	Simulasi Bilah.....	38
4.4	Proses Pembuatan Bilah .....	42
4.5	Proses Pengujian.....	44
4.5.1	Proses Keseimbangan .....	44
4.5.2	Pengujian Bilah .....	47
4.5.2.1	Pengujian ketahanan Bilah.....	47
4.5.2.2	Pengujian Daya Bilah.....	49
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN</b>		
5.1	Kesimpulan.....	57
5.2	Saran .....	57
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		59
<b>LAMPIRAN.....</b>		63



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Sirkulasi Udara .....	5
Gambar 2.2	Konservasi massa fluida yang mengalir dalam bejana.....	6
Gambar 2.3	Batas Betz pada efisiensi energi angin dan implikasinya.....	7
Gambar 2.4	Tipe wind turbine upwind dan tipe wind turbine downwind ...	9
Gambar 2.5	Tipe wind turbine Savonius dan tipe wind turbine Darrieus....	10
Gambar 2.6	Komponen utama wind turbine .....	10
Gambar 2.7	Geometri gaya yang bekerja pada airfoil.....	13
Gambar 2.8	Koefisien variasi gaya angkat angle of attack dari airfoil .....	14
Gambar 2.9	Nilai koefisien daya dan tip speed ratio untuk berbagai turbin	15
Gambar 2.10	Rancangan bilah dan klasifikasinya .....	16
Gambar 2.11	dua opsi bentuk bilah.....	16
Gambar 2.12	NACA airfoil profil, seri 4412 dan 4415.....	17
Gambar 2.13	Faktor Geometris Airfoil.....	18
Gambar 2.14	Efisiensi aerodinamik berbagai airfoil .....	19
Gambar 2.15	Blade geometry for analysis of wind turbine .....	20
Gambar 2.16	Pohon dan kayu Mahoni.....	27
Gambar 2.17	Pohon pinus .....	28
Gambar 3.1	Skema Tahapan Penelitian .....	29
Gambar 4.1	Model bilah NACA 4412 pada simulasi Qblade.....	36
Gambar 4.2	Model bilah NACA 4415 pada simulasi Qblade.....	37
Gambar 4.3	Perubahan nilai Cp-TSR.....	38
Gambar 4.4	Simulasi daya bilah jenis taper .....	39
Gambar 4.5	Simulasi daya bilah jenis taperless .....	39
Gambar 4.6	Simulasi daya pada kedua jenis bilah.....	40
Gambar 4.7	Pola distribusi angin pada timestep 1 – 100 dengan turbulensi sebesar 10% untuk kecepatan angin rata-rata 4 m/s .....	41
Gambar 4.8	Model 3D menggunakan Solidwork.....	42
Gambar 4.9	Proses pembuatan : a) Proses pembuatan menggunakan mesin CNC pada salah satu sisi bilah dan b) hasil pembuatan bilah .....	43



Gambar 4.10	Proses dan posisi kestimbangan pada bilah : a) Bilah dalam kondisi setimbang dan b) Posisi pengujian kesetimbangan bilah .....	45
Gambar 4.11	Proses kesetimbangan bilah yang dilakukan di LAN.....	46
Gambar 4.12	Kondisi kayu pinus sebelum dan sesudah pemasangan : a) kondisi awal sebelum pemasangan dan b) kondisi setelah pemasangan .....	48
Gambar 4.13	Kondisi kayu mahoni sebelum dan sesudah pemasangan : a) kondisi awal sebelum pemasangan dan b) kondisi setelah pemasangan .....	48
Gambar 4.14	Pengujian Ketahanan Bilah di LAN .....	49
Gambar 4.15	Sebaran kecepatan angin yang terjadi pada tanggal 28-10-2015	51
Gambar 4.16	Sebaran Daya yang dihasilkan pada tanggal 28-10-2015.....	51
Gambar 4.17	Sebaran kecepatan angin yang terjadi pada tanggal 30-10-2015	51
Gambar 4.18	Sebaran Daya yang dihasilkan pada tanggal 30-10-2015.....	52
Gambar 4.19	Sebaran kecepatan angin yang terjadi pada tanggal 5-11-2015	52
Gambar 4.20	Sebaran Daya yang dihasilkan pada tanggal 5-11-2015.....	52
Gambar 4.21	Sebaran kecepatan angin yang terjadi pada tanggal 6-11-2015	54
Gambar 4.22	Sebaran Daya yang dihasilkan pada tanggal 6-11-2015.....	54
Gambar 4.23	Sebaran kecepatan angin yang terjadi pada tanggal 9-11-2015	54
Gambar 4.24	Sebaran Daya yang dihasilkan pada tanggal 9-11-2015.....	55
Gambar 4.25	Sebaran kecepatan angin yang terjadi pada tanggal 10-11-2015	55
Gambar 4.26	Sebaran Daya yang dihasilkan pada tanggal 10-11-2015.....	55



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Nilai rata-rata sifat mekanis kayu pinus pada umur pohon 21 Thn dengan .....	28
Tabel 3.1	Rencana Kerja Penelitian .....	33
Tabel 4.1	Penentuan parameter panjang bilah .....	35
Tabel 4.2	Hasil Pengolahan data kayu pinus.....	50
Tabel 4.3	Hasil Pengolahan data kayu mahoni .....	53



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar belakang

Energi adalah konstituen yang paling besar dari pembangunan sosial ekonomi dan pertumbuhan ekonomi. Bahan bakar fosil adalah sumber energi yang paling banyak digunakan. Peningkatan gas rumah kaca di atmosfer, merupakan efek dari pembakaran bahan bakar fosil yang menyebabkan meningkatnya suhu permukaan bumi, isu perubahan iklim juga mengubah paradigma banyak negara, termasuk Indonesia akan perlunya keberpihakan kebijakan pemerintah pada energi terbarukan untuk mengurangi secara bertahap ketergantungan pada peran energi fosil. Dampak energi fosil yang buruk pada lingkungan berupa pencemaran dan andilnya terhadap fenomena perubahan iklim yang disebabkan “efek rumah kaca” - menyebabkan pergeseran paradigma tersebut. Pemanfaatan terhadap sumber daya alam yang terbarukan merupakan hal-hal yang harus dan terus dikembangkan agar tidak terjadi krisis dan kelangkaan energi (Karthikeyan dan kawan,2014).

Indonesia merupakan negara kepulauan yang 2/3 wilayahnya adalah lautan dan mempunyai garis pantai terpanjang ke-empat di dunia (setelah AS, Kanada, dan Rusia) yaitu  $\pm 95,181$  Km serta terletak di lintasan garis khatulistiwa, dan memiliki 17,480 pulau. Hampir sebagian besar kepulauan tersebut belum dialiri listrik oleh Pusat Listrik Negara karenanya kincir angin merupakan salah satu alternatif potensial memenuhi kebutuhan energi di Indonesia, khususnya di daerah - daerah kepulauan dengan potensi angin yang tersedia terus-menerus. Kincir angin ini menggunakan tenaga angin yang dikonversi menjadi energi listrik (Sudarsono, 2013).

Turbin angin dibagi menjadi dua kelompok utama berdasarkan arah sumbu yaitu turbin angin sumbu horisontal (horizontal axis wind turbine (HAWT) dan turbin angin sumbu vertikal (vertical axis wind turbine (VAWT), Setiap jenis turbin angin memiliki ukuran dan efisiensi yang berbeda, Yen dan kawan-kawan



(2013) melaporkan bahwa turbin angin sumbu horizontal dianggap lebih efisien daripada turbin angin sumbu vertikal.

Y daryanto (2007) melaporkan bahwa jenis HAWT Ketika menggunakan sudu yang banyak maka akan mengurangi tip speed ratio dari turbin tersebut sehingga dapat mempengaruhi gaya torsi pada turbin tersebut sedangkan dengan sudu dua atau tiga mempunyai torsi rendah tetapi memiliki putaran rotor yang tinggi sehingga cocok digunakan untuk keperluan pembangkitan listrik, Tenguria dan kawan (2011), menggunakan NACA airfoils untuk menentukan karakteristik aerodinamik dengan tiga bilah dengan sumbu horizontal. Hasil yang didapat adalah variasi *twist* dan *chord* hampir sama untuk semua *airfoil* yang digunakan. Nilai-nilai interferensi aksial dan faktor gangguan rotasi hampir sama untuk semua airfoil yang diambil dalam penelitian ini sehubungan dengan kecepatan tip rasio.

Potensi energi angin di Indonesia cukup memadai untuk pengembangan energi terbarukan berbasis kincir angin, karena kecepatan angin rata-rata berkisar 3 – 12 m/s. Hasil pemetaan Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) pada 120 lokasi menunjukkan, beberapa wilayah memiliki kecepatan angin di atas 5 m/detik, masing-masing Nusa Tenggara Timur, Nusa Tenggara Barat, Sulawesi Selatan, dan Pantai Selatan Jawa (Dailami,2001). Sehingga perlu dirancang suatu bilah atau bilah yang dapat beroperasi pada kecepatan angin yang rendah. Pemanfaatan material bilah yang ringan dan ketahanan yang tinggi diharapkan dapat meningkatkan efisiensi bilah yang akan diaplikasikan kedalam rotor kincir angin. Oleh karena itu dalam penelitian ini memanfaatkan bahan kayu lokal sebagai material dalam pembuatan bilah.

Kayu sebagai hasil sumber kekayaan alam, merupakan bahan mentah yang mudah diproses untuk dijadikan barang sesuai dengan kemajuan teknologi. Indonesia memiliki sumber potensi hutan yang tidak sedikit, ada sekitar 4.000 jenis kayu di Indonesia dan dari jumlah tersebut hanya sebagian kecil saja yang telah diketahui sifat dan kegunaanya (J. F. Dumanou, 2001). Pemanfaatan kayu salah satunya dapat digunakan sebagai bahan dasar pembuatan bilah kincir angin, tidak semua jenis kayu dapat dimanfaatkan sebagai bilah kincir angin.



Kayu sebagai bahan dasar bilah kincir angin memiliki ketahanan mekanik yang tinggi serta mudah didesain berdasarkan karakteristik bilah kincir angin yang sudah ada, dan juga ringan sehingga dapat berkerja pada kecepatan angin rendah dan diharapkan dapat meningkatkan produksi energi yang ditangkap oleh rotor kincir angin.

Pada penelitian ini akan dirancang bilah kincir angin dengan menggunakan program QBlade, bilah yang akan dirancang merupakan bilah airfoil NACA (*The United States National Advisory Committee for Aeronautics*) 4412 dan 4415 yang dimodifikasi dengan merubah jenis taper bilah menjadi taperless, bahan pembuatan bilah berasal dari kayu Mahoni (*Swietenia macrophylla*) dan kayu Pinus (*Pinus merkusii*). Hasil perhitungan secara simulasi dan ekperiment akan dibandingkan juga.

### **1.1 Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan maka dapat dirumuskan beberapa masalah yaitu :

1. Bagaimana merancang bilah yang dapat digunakan pada kincir angin sumbu horizontal (HWAT) pada kecepatan angin 1 – 12 m/s.
2. Bagaimana memanfaatkan potensi lokal di Indonesia khususnya kayu alam untuk pengembangan bilah kincir angin di Indonesia.
3. Bagaimana membuat bilah dengan bahan dasar kayu sehingga dapat digunakan pada kecepatan angin 1 – 12 m/s.
4. Bagaimana merancang *airfoil* NACA seri 44xx secara simulasi sehingga dapat meningkatkan effesisensi kincir angin.

### **1.2 Batasan Masalah**

Permasalahan pada penelitian ini dibatasi sebagai berikut:

1. Desain bilah akan digunakan pada kincir angin sumbu horizontal (HAWT) pada kecepatan angin rata-rata 1 – 12 m/s, bilah yang digunakan merupakan jenis Taper dan Taperless
2. Bahan dasar pembuatan bilah dilakukan dengan jenis kayu Mahoni (*Swietenia macrophylla*) dan kayu Pinus (*Pinus merkusii*).



3. Bilah akan didesain secara simulasi dengan jenis airfoil NACA seri 4412 dan NACA seri 4415.
4. Pengujian bilah akan dilakukan di daerah Ciheres tepatnya di Lenteng Angin Nusantara.

### 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini antara lain :

1. Memanfaatkan tipe terbaik dari airfoil NACA seri 4412 dan 4415 secara simulasi dengan Qblade v0.9 untuk mengetahui efisiensi kincir angin dengan modifikasi jenis taper dan taperless.
2. Membuat bilah Kincir angin dengan menggunakan kayu Mahoni (*Swietenia macrophylla*) dan kayu Pinus (*Pinus merkusii*).
3. Membandingkan kinerja bilah kincir angin dari kayu Mahoni (*Swietenia macrophylla*) dan kayu Pinus (*Pinus merkusii*) dalam menghasilkan energi listrik.

### 1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah prototipe yang telah dirancang dapat digunakan sebagai referensi untuk menunjang pertumbuhan energi terbarukan khususnya energi angin dengan pemanfaatan kayu sebagai bilah atau kincir yang akan digunakan pada kincir angin pembangkit listrik dengan desain airfoil NACA terbaik dari hasil penelitian sehingga dapat berkerja pada kecepatan angin rendah dengan memberikan daya keluaran yang dapat digunakan untuk kebutuhan rumah tangga.



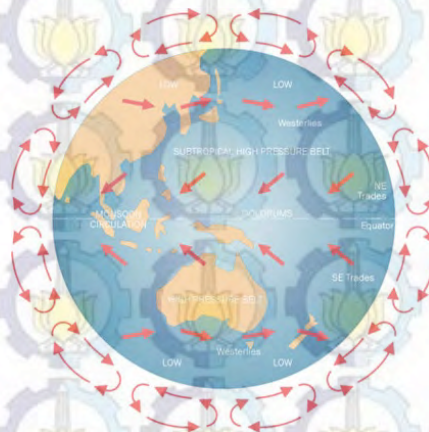
## BAB 2

### KAJIAN PUSTAKA

#### 2.1 Definisi Energi Angin

Sekitar 2% dari sinar matahari yang mengalir ke bumi diubah menjadi tenaga angin, yang mana hasil akhirnya berubah menjadi panas dikarenakan gesekan dengan lapisan batas atmosfer. Radiasi matahari memanaskan di berbagai tempat di bumi dengan kecepatan yang berbeda pada siang dan malam hari. Hal ini menyebabkan berbagai bagian atmosfer memanaskan dalam waktu yang berbeda. Udara panas menaik, dan udara yang lebih sejuk tertarik untuk menggantikannya. Inilah yang menyebabkan terjadinya angin (Gambar 2.1). Jadi angin, yang disebabkan oleh gerakan molekul udara di atmosfer, berasal dari energi matahari. Semua benda statis termasuk molekul udara menyimpan energi laten yang disebut dengan energi potensial. Pada saat molekul udara mulai bergerak, maka energi potensialnya dikonversi menjadi energi kinetik (energi gerakan) sebagai akibat dari kecepatan molekul udara (contained energi Indonesia, 2011).

Energi kincir angin yang berasal dari energi kinetik angin dan mengkonversinya menjadi energi mekanis atau listrik yang bisa dimanfaatkan untuk berbagai kebutuhan. Angin bertiup diantara bilah atau aerofoil dari turbin angin, yang menyebabkan rotor berputar dengan cepat. Turbin angin menggunakan gerakan rotasi untuk membangkitkan listrik atau menjalankan peralatan mesin seperti pompa (contained energi Indonesia, 2011).

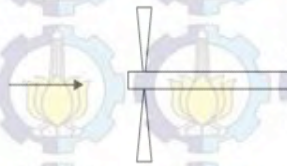


Gambar 2.1 Sirkulasi Udara (<http://soer.justice.tas.gov.au/>)



## 2.2 Teori Kincir Angin

Sebuah kincir angin mengekstrak listrik dari angin dengan memperlambat aliran angin. Ketika kecepatan angin kurang kuat untuk memutar rotor, rotor jelas tidak menghasilkan daya dan pada kecepatan rotasi yang sangat tinggi melebihi kapasitas putaran rotor maka tidak ada daya yang dihasilkan (T. Al Shemmeri, 2010).



Gambar 2.2 kerangka wind turbine

Daya yang dihasilkan ( $P_{kin}$ ) oleh turbin angin adalah energi kinetik keseluruhan dari turbin angin (dari kecepatan udara awal  $V_1$  ke turbin dengan kecepatan udara  $V_2$ ) diberikan sebagai berikut (T. Al Shemmeri, 2010) :

$$P_{kin} = \frac{1}{2} m(V_1^2 - V_2^2) \quad (2.1)$$

Laju aliran massa angin ( $m$ ) diberikan oleh persamaan kontinuitas sebagai produk densitas ( $\rho$ ), luasan yang menyapu rotor dari turbine ( $A$ ) dan kecepatan pendekatan udara ( $V_a$ ), diberikan oleh persamaan (T. Al Shemmeri, 2010) :

$$m = \rho A V_a \quad (2.2)$$

Oleh karena itu daya menjadi

$$P_{kin} = \frac{1}{2} \rho A V_a (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.3)$$

Karena kecepatan rotor adalah kecepatan rata-rata ( $V_a$ ) antara inlet dan outlet, sehingga

$$V_a = \frac{1}{2} (V_1 + V_2) \quad (2.4)$$

oleh karena itu

$$P_{kin} = \frac{1}{2} \rho A \frac{1}{2} (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2)$$



$$P_{kin} = \frac{1}{4} \rho A (V_1^3 - V_2^3 - V_2^3 V_1^3 + V_2 V_1^2)$$

$$P_{kin} = \frac{1}{4} \rho A [1 - (V_2 / V_1)^3 - (V_2 / V_1)^2 + V_2 / V_1] \quad (2.5)$$

Untuk menemukan daya maksimum diekstraksi oleh rotor, menurunkan persamaan 11 terhadap  $V_2$  dan menyamakannya dengan nol.

$$dP_{kin} / dV_2 = 1/4 \rho A (-3V_2^2 - 2V_1 V_2 + V_1^2) = 0 \quad (2.6)$$

karena daerah luasan rotor ( $A$ ) dan kerapatan udara ( $\rho$ ) tidak dapat nol, ekspresi di braket persamaan 2.5 harus bernilai nol oleh karena itu, persamaan menjadi (T. Al Shemmeri, 2010)

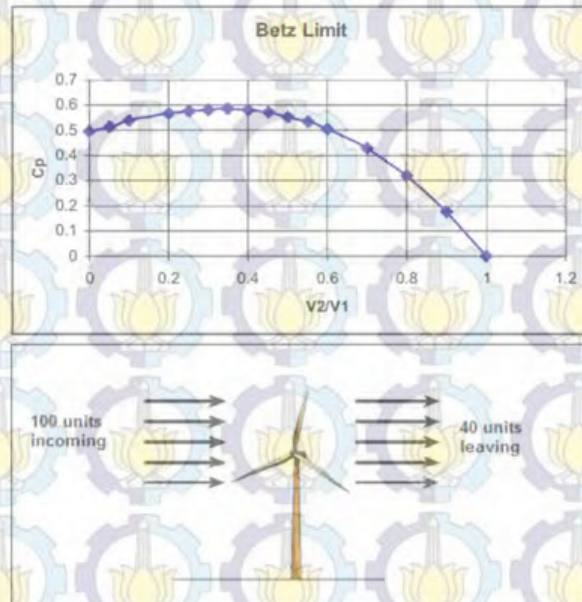
$$(3V_2 - V_1)(V_2 + V_1) = 0$$

$V_2 = V_1$  tidak realistis dalam situasi ini, hanya ada satu solusi, persamaan 6 memberikan :

$$V_2 = 1/3 V_1 \quad (2.7)$$

Masukan persamaan 2.7 kedalam persamaan 2.5 sehingga didapatkan (T. Al Shemmeri, 2010)

$$P = (0.5925)^{1/2} \rho A V^3 \quad (2.8)$$



Gambar 2.3 Batas Betz pada efisiensi energi angin dan implikasinya (T. Al Shemmeri, 2010).



Fraksi maksimum teoritis daya yang berasal dari angin yang bisa diambil oleh kincir angin yang ideal, oleh karena itu fraksi 0,5925 disebut Koefisien Betz ( $C_p$ ). Karena ketidaksempurnaan aerodinamis di setiap mesin praktis akan terjadi kehilangan daya, daya yang diekstrak berkurang. Gambar 2.4 menunjukkan efek turbin angin desain implikasi daya yang dihasilkan yang dapat dimanfaatkan dari angin yang masuk. Efisien turbin angin tergantung pada produksi dari rasio kecepatan optimal memberikan daya maksimum atau mendekati daya maksimum yang mungkin.

## 2.3 Wind Turbine

Secara umum wind turbine dibedakan berdasarkan perbedaan sumbu yang memberikan bentuk varian dari setiap jenis sumbu yang digunakan, jenis wind turbine yang digunakan saat dibedakan menjadi dua tipe, yaitu :

### 2.3.1 HAWT (*Horizontal Axis Wind Turbine*)

HAWT mempunyai ciri sumbu putar turbin sejajar terhadap tanah. Turbin jenis ini paling banyak dikembangkan di berbagai negara. Cocok dipakai untuk menghasilkan listrik. Turbin angin dengan sumbu horizontal mempunyai sudu yang berputar dalam bidang vertikal seperti halnya propeler pesawat terbang.

Turbin angin biasanya mempunyai sudu dengan bentuk irisan melintang khusus di mana aliran udara pada salah satu sisinya dapat bergerak lebih cepat dari aliran udara di sisi yang lain ketika angin melewatinya. Fenomena ini menimbulkan daerah tekanan rendah pada belakang sudu dan daerah tekanan tinggi di depan sudu. Perbedaan tekanan ini membentuk gaya yang menyebabkan sudu berputar (Y. Daryanto, 2007). Terdiri dari dua tipe yaitu mesin upwind dan mesin downwind (Hasyim dan kawan, 2012) :





Gambar 2.4 tipe wind turbine upwind dan tipe wind turbine downwind  
(<http://www.power-talk.net/>)

- a. Mesin *upwind*: rotor berhadapan dengan angin. Rotor didesain tidak fleksibel, dan diperlukan mekanisme yaw untuk menjaga rotor agar tetap berhadapan dengan angin.
- b. Mesin *downwind*: rotor ditempatkan di belakang tower. Rotor dapat dibuat lebih fleksibel, lebih ringan daripada mesin upwind. Kelemahannya adalah bahwa angin harus melewati tower terlebih dulu sebelum sampai pada rotor, sehingga menambah beban (*fatigue load*) pada turbin.

### 2.3.2 VAWT (Vertical Axis Wind Turbine)

VAWT memiliki ciri sumbu putar vertikal terhadap tanah. Turbin jenis ini jarang dipakai untuk turbin komersial. Rotornya berputar relatif pelan ( $< 100$  rpm), tetapi memiliki momen gaya yang kuat, sehingga dapat dipakai untuk menggiling biji-bijian, pompa air, tetapi tidak cocok untuk menghasilkan listrik. Sebenarnya dapat dipakai gearbox untuk menaikkan kecepatan putarnya, tetapi efisiensinya turun dan mesin sulit untuk mulai berputar. VAWT terdiri dari dua tipe, yaitu (Hasyim dan kawan, 2012):

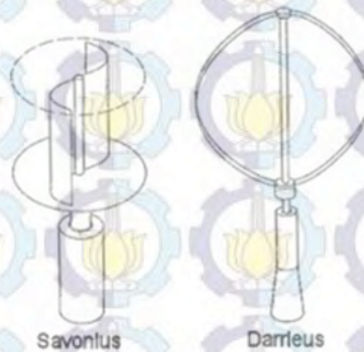
#### 1. Tipe dorong (*Savonius*)

Terjadi bila  $TSR < 1$  artinya lebih banyak bagian bilah yang mengalami gaya dorong, tipe dorong kebanyakan menggunakan sudu tipe pelat lengkung dengan jenis sudu propeller dipasangkan melengkung.



## 2. Tipe angkat (*Darrieus*)

Terjadi bila  $TSR > 1$  artinya lebih banyak bagian bilah yang mengalami gaya angkat, Sepertipada turbin Darrius. Masing-masing bilah memperlihatkan momen gaya angkat maksimum hanyadua kali setiap putaran dan daya keluarannya berbentuk sinusoida. Ukuran bilah relatif besar dan tinggi, sehingga menimbulkan getaran.

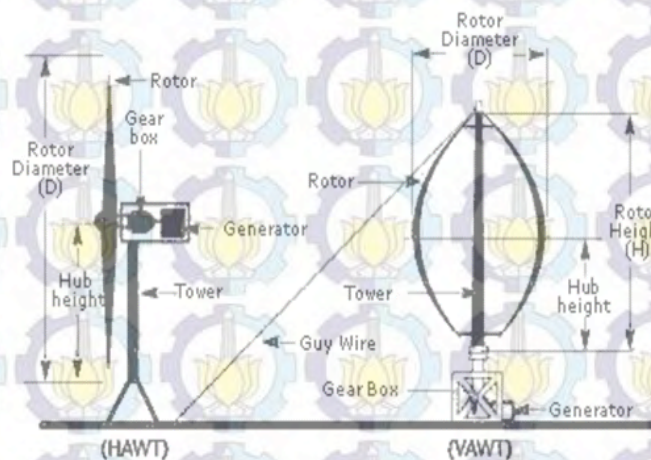


Gambar 2.5 tipe wind turbine Savonius dan tipe wind turbine Darrieus  
(<http://winddturbin.com>)

### 2.3.3 Komponen Utama Wind Turbin

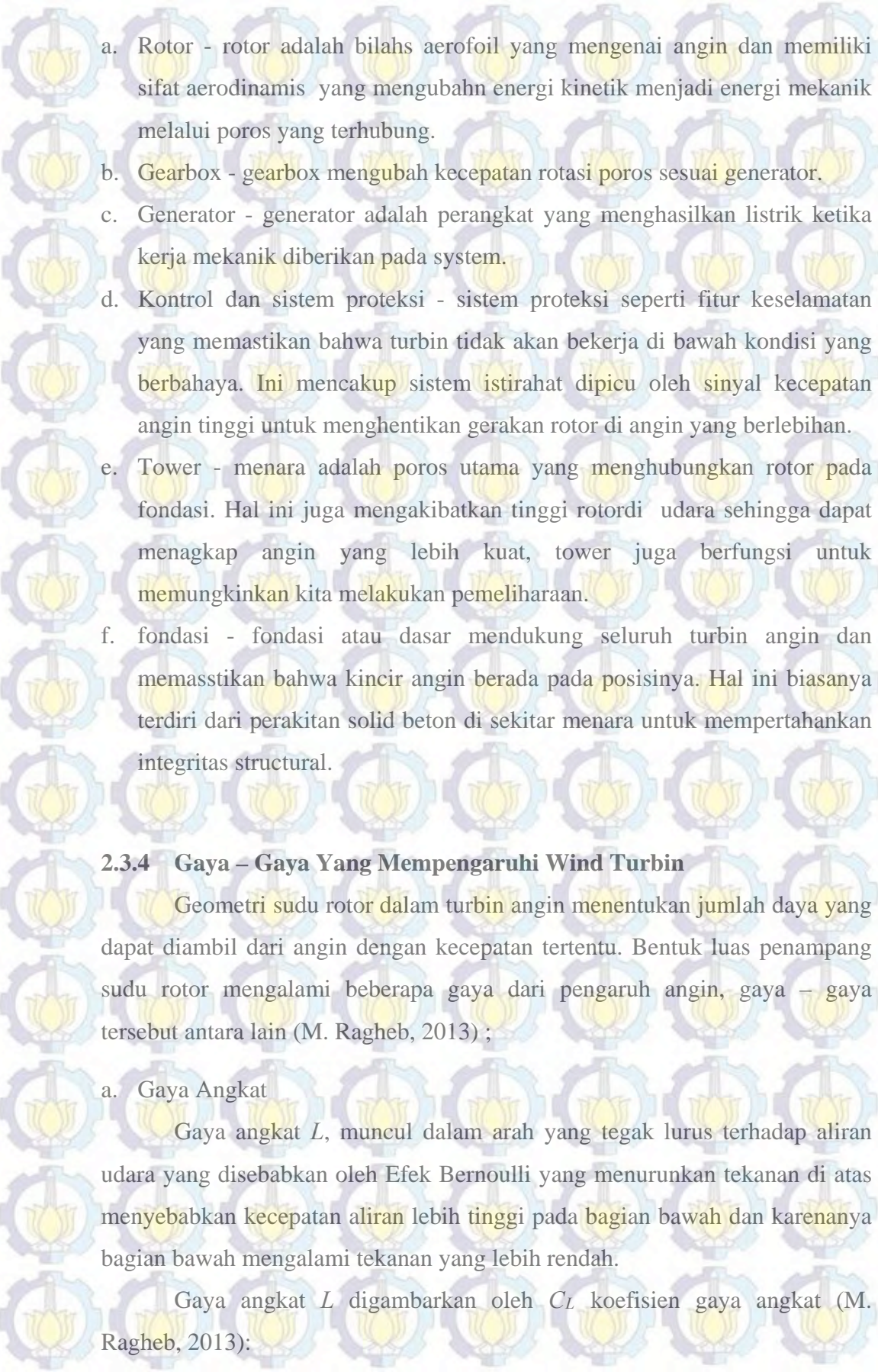
Turbin angin biasanya memiliki enam komponen utama: rotor, gearbox, generator, kontrol dan sistem proteksi, menara dan pondasi.

Komponen-komponen utama dapat dilihat pada gambar berikut (T. Al Shemmeri, 2010) :



Gambar 2.6 Komponen utama wind turbine (T. Al Shemmeri, 2010).



- 
- a. Rotor - rotor adalah bilahs aerofoil yang mengenai angin dan memiliki sifat aerodinamis yang mengubah energi kinetik menjadi energi mekanik melalui poros yang terhubung.
  - b. Gearbox - gearbox mengubah kecepatan rotasi poros sesuai generator.
  - c. Generator - generator adalah perangkat yang menghasilkan listrik ketika kerja mekanik diberikan pada system.
  - d. Kontrol dan sistem proteksi - sistem proteksi seperti fitur keselamatan yang memastikan bahwa turbin tidak akan bekerja di bawah kondisi yang berbahaya. Ini mencakup sistem istirahat dipicu oleh sinyal kecepatan angin tinggi untuk menghentikan gerakan rotor di angin yang berlebihan.
  - e. Tower - menara adalah poros utama yang menghubungkan rotor pada fondasi. Hal ini juga mengakibatkan tinggi rotordi udara sehingga dapat menangkap angin yang lebih kuat, tower juga berfungsi untuk memungkinkan kita melakukan pemeliharaan.
  - f. fondasi - fondasi atau dasar mendukung seluruh turbin angin dan memastikan bahwa kincir angin berada pada posisinya. Hal ini biasanya terdiri dari perakitan solid beton di sekitar menara untuk mempertahankan integritas structural.

#### **2.3.4 Gaya – Gaya Yang Mempengaruhi Wind Turbin**

Geometri sudu rotor dalam turbin angin menentukan jumlah daya yang dapat diambil dari angin dengan kecepatan tertentu. Bentuk luas penampang sudu rotor mengalami beberapa gaya dari pengaruh angin, gaya – gaya tersebut antara lain (M. Ragheb, 2013) ;

- a. Gaya Angkat

Gaya angkat  $L$ , muncul dalam arah yang tegak lurus terhadap aliran udara yang disebabkan oleh Efek Bernoulli yang menurunkan tekanan di atas menyebabkan kecepatan aliran lebih tinggi pada bagian bawah dan karenanya bagian bawah mengalami tekanan yang lebih rendah.

Gaya angkat  $L$  digambarkan oleh  $C_L$  koefisien gaya angkat (M. Ragheb, 2013):



$$C_L = \frac{L / A}{1/2 \rho V^2} \quad (2.9)$$

dengan  $\rho$  adalah densitas udara ( $\text{kg/m}^3$ ),  $V$  adalah kecepatan angin ( $\text{m/s}$ ),  $A$  adalah luas penampang airfoil ( $\text{m}^2$ ),  $L$  adalah Gaya angkat (Newton)

b. Gaya hambat

Gaya hambat  $D$  muncul dalam arah yang berlawanan dari gaya angkat  $L$  terhadap aliran udara yang disebabkan oleh Efek Bernoulli yang menurunkan tekanan di bawah menyebabkan kecepatan aliran lebih tinggi pada bagian atas dan karenanya bagian atas mengalami tekanan yang lebih rendah. Gaya hambat  $D$  digambarkan oleh koefisien drag  $C_D$  (M. Ragheb, 2013)

$$C_D = \frac{D / A}{1/2 \rho V^2} \quad (2.10)$$

dengan  $A$  adalah luas efektif dari airfoil ke arah drag ( $\text{m}^2$ ), dan  $D$  adalah Gaya hambat (Newton). Gaya angkat  $L$  dan drag  $D$  bervariasi dengan sudut bilah rotor bersamaan arah aliran udara yang ditentukan sebagai angle of attack  $\alpha$ .

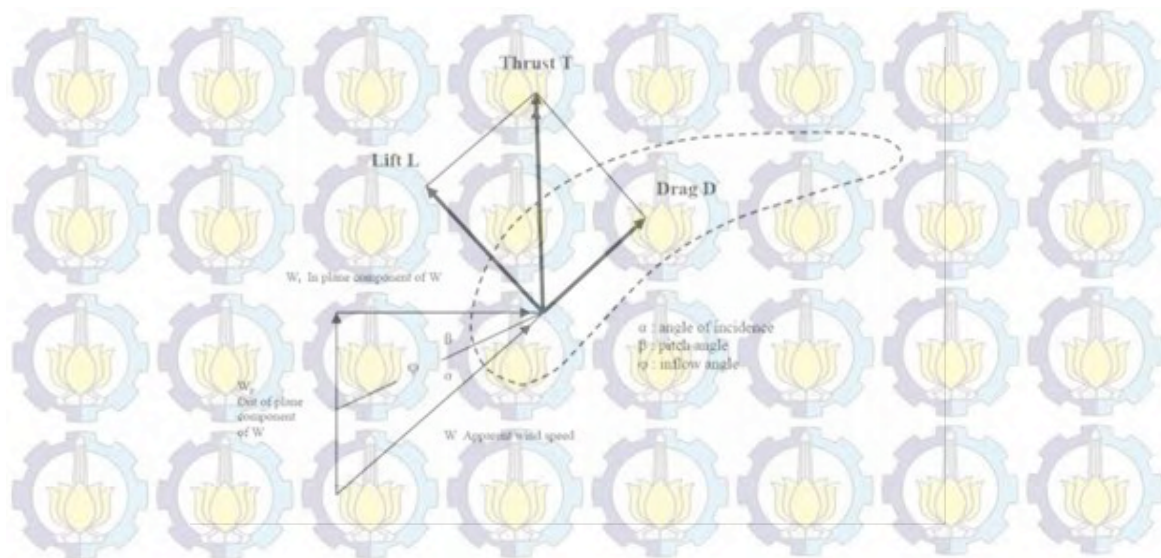
c. Gaya dorong

Resultan dari gaya angkat dan gaya tarik merupakan gaya dorong  $T$  yang efektif memutar sudu rotor. Rasio resultan dari lift untuk drag  $L/D$  adalah fungsi dari angle of attack  $\alpha$  untuk bagian airfoil tertentu. Nilai maksimum profil rasio  $L/D$  sesuai dengan sudut optimal serangan untuk mencapai efisiensi maksimum rotor bilah turbin angin.

d. Stall

Desainer turbin angin memanfaatkan kondisi stall dalam pengendalian turbin angin. Mereka sengaja menghasilkan stall untuk menghentikan rotor angin dari putaran dengan kecepatan tinggi dalam kondisi angin kencang yang dapat menyebabkan kerusakan.





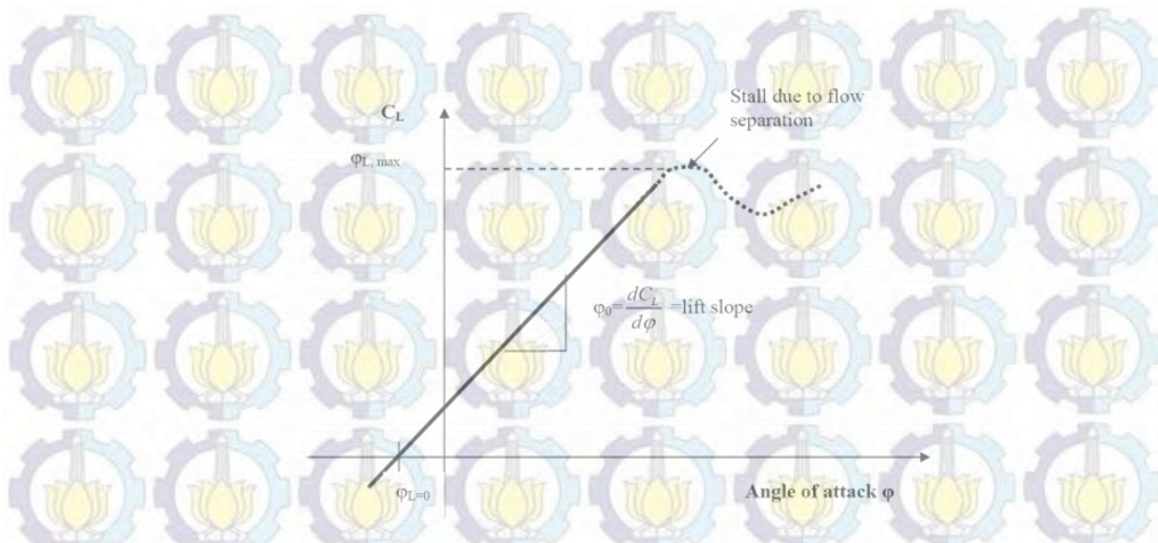
Gambar 2.7 Geometri gaya yang bekerja pada airfoil

(M. Ragheb, 2013)

Pada keadaan angin rendah sampai sedang sudut serangan koefisien Lift bervariasi secara linear dengan sudut serangan. Kemiringan garis lurus ini adalah  $\varphi_0$  dan dirancang sebagai lift kemiringan. Sedangkan sudut serangan lebih besar, sehingga aliran yang memisahkan permukaan bagian atas airfoil menciptakan gaya yang besar sehingga gaya yang relatif kecil dibagian bawah airfoil. Ketika aliran udara diubah dan kemudian tiba-tiba menurun. Konsekuensinya adalah penurunan terjal dalam lift dan peningkatan besar dialami oleh drag. Dalam kondisi ini airfoil dikatakan stall.

Gambar 2.8 Koefisien variasi gaya angkat angle of attack dari airfoil, nilai maksimum koefisien Lift diperoleh sebelum terjadi stall dan dilambangkan sebagai  $C_{Lmax}$  dan merupakan salah satu aspek yang paling penting dari kinerja airfoil. Semakin tinggi Lift, semakin rendah kecepatan stalling.





Gambar 2.8 Koefisien variasi gaya angkat angle of attack dari airfoil.

(M. Ragheb, 2013)

## 2.4 Teori HAWT Design Bilah

Bilah pada kincir merupakan elemen yang penting, bilah berfungsi mengubah gerak angin menjadi gerakan mekanik. Seiring perkembangan teknologi wind turbin, bilah telah mengalami berbagai perkembangan dengan semakin banyaknya variasi bahan, ukuran, jenis airfoil, jumlah bilah. Pada turbin angin horizontal axis, hal yang penting untuk diperhatikan adalah jari-jari bilah, jumlah bilah, sudut pitch, panjang chord, jenis airfoil, dan bahan bilah. Dimensi rotor turbin berpengaruh terhadap kemampuan turbin untuk menangkap angin yang melewati turbin. Semakin besar diameter rotor, maka semakin besar pula area sapuan angin yang dapat dimanfaatkan. Namun hal ini akan berpengaruh terhadap kecepatan rotor turbin tersebut, semakin besar rotor, maka koefisien daya akan makin besar dan kecepatan putaran turbin akan makin rendah (Rand, 2010). HAWT sangat sensitif terhadap perubahan profil bilah dan desain. Parameter utama yang mempengaruhi kinerja Bilah HAWT :

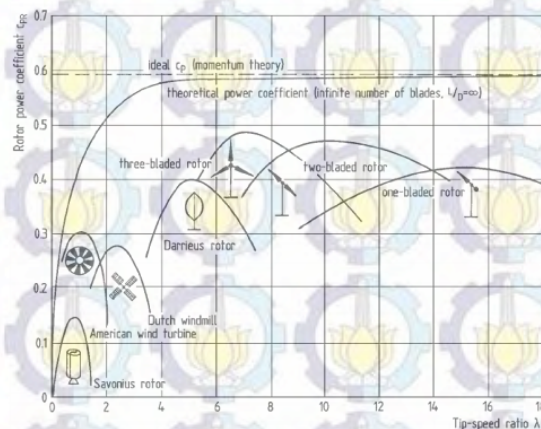
### 2.4.1 TSR (Tip Speed Ratio)

Tip speed Ratio didefinisikan sebagai hubungan antara kecepatan bilah rotor dan kecepatan angin relative, TSR adalah parameter desain terpenting di mana semua dimensi rotor optimum lainnya dihitung (Peter J. Schubel, 2012):



$$\lambda = \frac{\Omega r}{V} \quad (2.11)$$

dengan  $\lambda$  adalah Tip speed Ratio,  $\Omega$  adalah kecepatan rotasi bilah (rad/s),  $r$  adalah radius (m) dan  $V$  adalah kecepatan angin (m/s). Wind turbine sumbu horisontal yang memiliki 3 bilah memiliki nilai koefisien daya dan tip speed ratio tertinggi bila dibandingkan dengan jenis lainya dimana seperti yang terlihat pada Gambar 2.9,



Gambar 2.9. Nilai koefisien daya dan tip speed ratio untuk berbagai turbin (Erich Hau, 2005).

#### 2.4.2 Perancangan Bentuk dan Jumlah Bilah

Perancangan bentuk dan jumlah bilah mengacu pada Metode Betz yang memberikan bentuk dasar dari bilah turbin angin modern. Namun, dalam prakteknya metode yang lebih maju dengan optimasi sering digunakan. Berikut persamaan yang dapat digunakan dalam perancangan bentuk dan jumlah bilah (Peter J. Schubel, 2012):

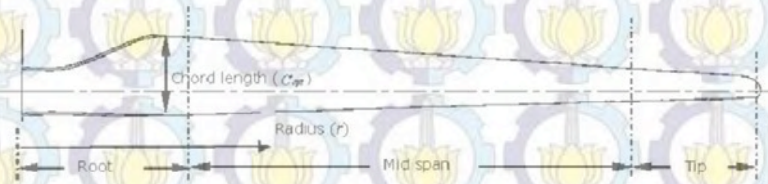
$$C = \frac{2\pi r}{n} \frac{8}{9C_L} \frac{U_{wd}}{\lambda V_r} \quad (2.12)$$

$$\text{dengan } V_r = \sqrt{V^2 - U^2}$$

Dengan  $r$  adalah jari-jari bilah (m),  $n$  adalah jumlah bilah,  $C_L$  adalah koefisien Lift,  $\lambda$  adalah tip speed ratio,  $V_r$  adalah total kecepatan angin (m/s),

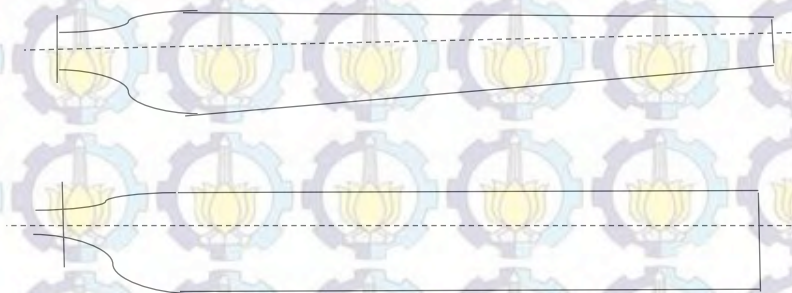


$U$  adalah Wind Speed (m/s),  $U_{wd}$  adalah kecepatan angin design (m/s) dan  $C_{opt}$  adalah panjang optimum chord.



Gambar 2.10 Rancangan bilah dan klasifikasinya (Peter J. Schubel , 2012)

Jenis – jenis bilah kincir untuk turbin angin sumbu horizontal yang biasa digunakan untuk kecepatan angin rendah mengacu pada dua jenis bilah, yaitu jenis Taper, taper less seperti yang tersaji pada gambar berikut:

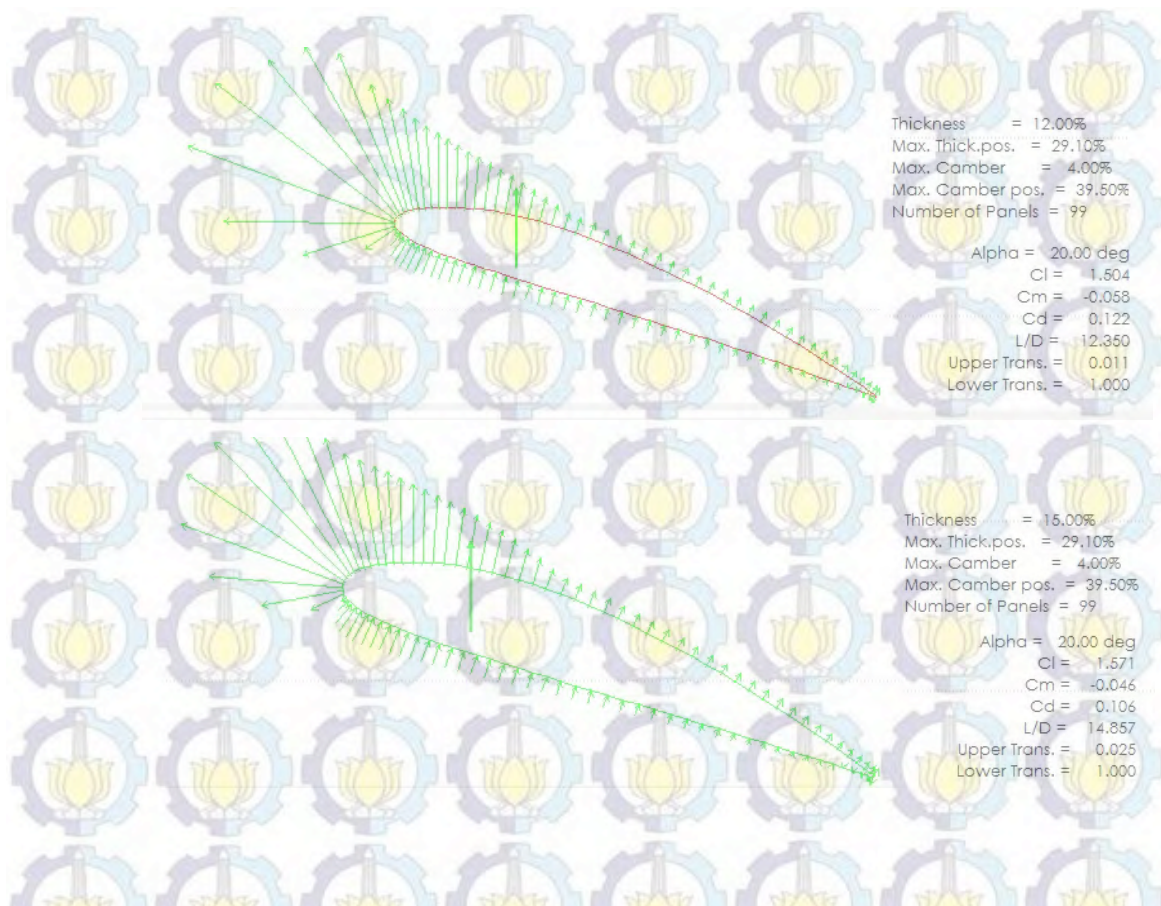


Gambar 2.11 dua opsi bentuk bilah

### 2.4.3 Profil Airfoil

Bentuk propeler yang ideal adalah bentuk airfoil, karena bentuk tersebut dapat menyerap energi kinetik angin menjadi energi gerak putar dengan maksimal. Bentuk penampang airfoil telah distandarkan oleh NACA (National Advisory Committee for Aeronautics). Tipe standar yang banyak digunakan untuk propeler kincir angin NACA 4412 dan 4415 bentuk penampang propeler airfoil dapat beragam pada tiap titik penampang. Gambar 2.12 menunjukkan bentuk dan desain penampang propeler airfoil NACA 4415.





Gambar 2.12 Spesifikasi *airfoil* NACA 4412 dan 4415 untuk pola tekanan secara simulasi menggunakan QBlade

Bagian-bagian dari sebuah *airfoil* adalah :

- Mean chamber line* adalah garis tengah antara permukaan atas dan bawah dari *airfoil*.
- Leading edge* adalah titik paling depan pada *mean chamber line*.
- Trailing edge* adalah titik paling belakang pada *mean chamber line*.
- Chord line* adalah garis lurus yang menghubungkan *leading edge* dan *trailing edge*.
- Chord (c)* adalah jarak antara *leading edge* dan *trailing edge* sepanjang *chord line*.
- Chamber* (permukaan yang benjol) adalah jarak antara *mean chamber line*, tegak lurus terhadap *chord line*.

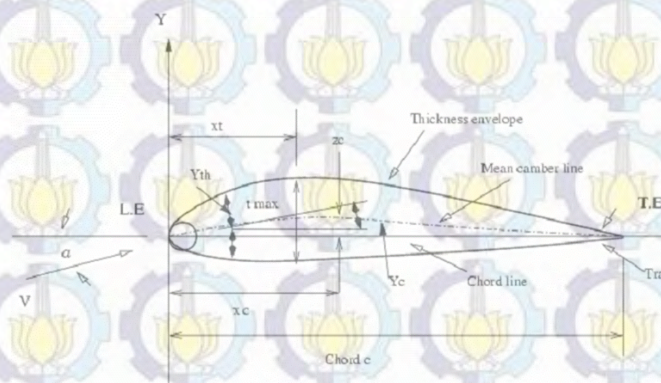


g. *Thickness* adalah jarak antara permukaan atas dan bawah, juga tegak lurus terhadap *chord line*

*line*.

h. *Angle of attack* adalah sudut antara angin relatif dengan *chord line*.

Parameter yang mempunyai efek pada performansi aerodinamik sebuah airfoil termasuk: chord line, mean camber line, thickness envelope, thickness maximum, chord line, chord  $c$ , dan trailing edge angle seperti pada Gambar 2.13.

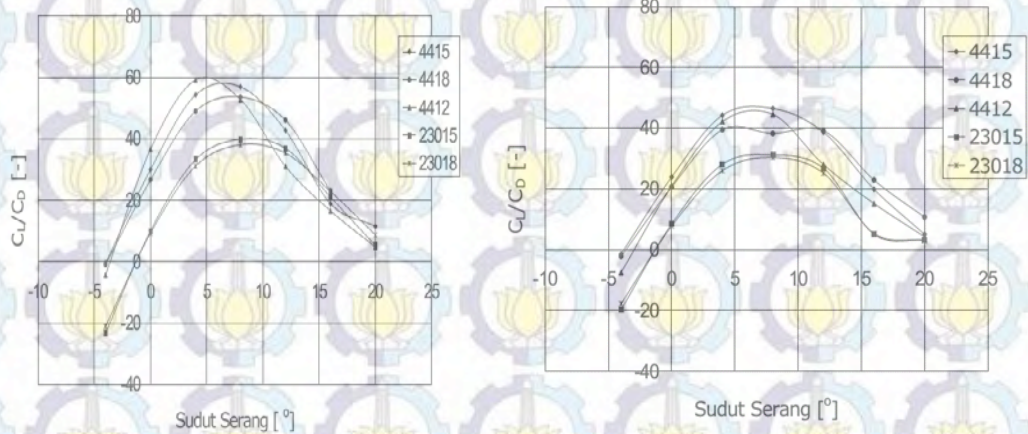


Gambar 2.13 Faktor Geometris Airfoil (Sudarsono, 2013)

Secara teknis rancangan aerodinamik yang baik akan memberikan keluaran berupa distribusi sudut pasang dan distribusi panjang chord sudu yang tepat. Perancangan aerodinamik lebih lanjut akan menyarankan modifikasi airfoil (bentuk irisan melintang sudu) menjadi bentuk yang tidak konvensional. Bahkan pada tahap desain lanjut dapat juga diciptakan bentuk-bentuk airfoil baru yang tidak sama distribusinya dari pangkal hingga ke ujung sudu. Secara ideal bentuk airfoil sudu harus mempunyai efisiensi aerodinamik yang paling tinggi. Tetapi pembuatannya secara teknis cukup sulit dan membutuhkan biaya yang tinggi.

Untuk penerapan yang praktis ekonomis, biasanya dipilih rancangan aerodinamik yang optimal. Efisiensi aerodinamik yang dimaksud di sini adalah perbandingan antara gaya angkat dan gaya hambat dari profil airfoil sudu. Contoh dari efisiensi aerodinamik untuk pelat datar dan airfoil NACA series (44xx dan 230xx), pada bilangan Reynold  $10^5$  dan  $1.5 \times 10^6$  diperlihatkan masing-masing pada Gambar 2.14 di bawah ini (Y Daryanto, 2010).





Gambar 2.14 Efisiensi aerodinamik berbagai airfoil (Y Daryanto, 2010).

#### 2.4.4 Analisis Elemen Bilah

Hingga sekarang teori momentum dicoba untuk menjelaskan desain rotor HAWT tetapi tidak mempertingkan dampak dari karakteristik geometri rotor seperti distribusi chord dan twists airfoil bilah. Oleh sebab itu teori elemen bilah perlu ditambahkan dalam metode desain. Dalam rangka analisis elemen bilah, diasumsikan bahwa bilah dibagi menjadi beberapa bagian  $N$ . Analisis ini didasarkan pada asumsi unsur – unsur aerodinamis adalah homogen dan gaya pada elemen bilah hanya ditentukan oleh koefisien gaya angkat dan gaya hambat (Emrah Kulunk, 2011). Seperti ditunjukkan dalam Gambar. 2.16, hubungan berikut antara parameter dapat ditentukan sebagai berikut (Qiyue Song, 2012).

$$\theta_r = \theta_p - \theta_{p,0} \quad (2.13)$$

$$\phi = \theta_p + \alpha \quad (2.14)$$

$$a = \frac{V_1 - V_2}{V_2} \quad (2.15)$$

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \quad (2.16)$$

$$\tan \phi = \frac{U(1-a)}{\Omega r(1+a')} = \frac{1-a}{(1+a')\lambda_r} \quad (2.17)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left[ \frac{1-a}{(1+a')\lambda_r} \right] \quad (2.18)$$



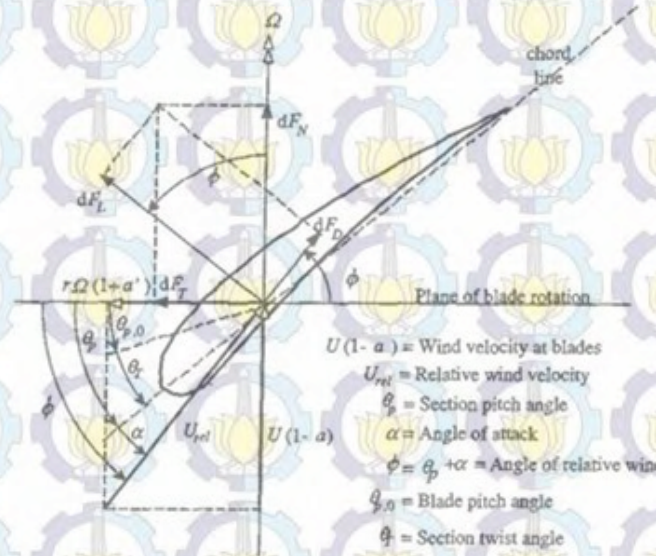
$$U_{rel} = U(1-a) / \sin \phi \quad (2.19)$$

$$dF_L = C_L \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c dr \quad (2.20)$$

$$dF_D = C_D \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c dr \quad (2.21)$$

$$dF_N = dF_L \cos \phi + dF_D \sin \phi \quad (2.22)$$

$$dF_\tau = dF_L \sin \phi - dF_D \cos \phi \quad (2.23)$$



Gambar 2.15 Blade geometry for analysis of wind turbine (Qiyue Song, 2012).

Pada Gambar 2.16,  $\theta_p$  adalah sudut bagian pitch,  $\theta_{p,0}$  adalah bilah sudut bagian pitch,  $\theta_r$  adalah bagian sudut sentuhan yang didefinisikan relatif terhadap pitch,  $\alpha$  adalah sudut serangan,  $\phi$  adalah sudut relatif angin,  $dF_L$  adalah deferensial gaya angkat,  $dF_D$  adalah deferensial gaya hambat,  $dF_N$  adalah deferensial gaya normal terhadap bidang rotasi (terkait dengan thrust), dan  $dF_\tau$  adalah deferensial gaya tangensial yang menyapu lingkaran oleh rotor, yang berkontribusi pada torsi,  $U_{rel}$  adalah kecepatan angin relatif,  $U(1-a)$  adalah kecepatan angin di bilah,  $a$  adalah penurunan kecepatan,  $a'$  adalah faktor induksi anguler.

Jika rotor memiliki jumlah bilah  $B$ , total gaya normal pada radius  $r$ ,



$$dF_N = \sigma \rho \pi \frac{U^2 (1-a)^2}{\sin^2 \phi} (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) r dr = \sigma \rho \pi \frac{U^2 (1-a)^2}{\sin^2 \phi} C_N r dr \quad (2.24)$$

Torsi diferensial daru gaya tangensial pada radius  $r$ , adalah

$$dF_\tau = \sigma \rho \pi \frac{U^2 (1-a)^2}{\sin^2 \phi} (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) r dr = \sigma \rho \pi \frac{U^2 (1-a)^2}{\sin^2 \phi} C_\tau r dr \quad (2.25)$$

Umumnya koefisien beban normal  $C_N$  dan koefisien beban tangensial  $C_\tau$  didefinisikan sebagai (Hansen, 2008) :

$$C_N = C_L \cos \phi + C_D \sin \phi \quad (2.26)$$

$$C_\tau = C_L \sin \phi - C_D \cos \phi \quad (2.27)$$

Dan  $\sigma$  adalah soliditas lokal, yang didefinisikan oleh:

$$\sigma = Bc / 2\theta r \quad (2.28a)$$

Dimana,  $c$  adalah panjang chord bilah pada radius  $r$ . Menentukan distribusi panjang chord  $c$  airfoil yang digunakan berdasarkan pendekatan, rumus pendekatan tersebut menghasilkan bentuk sudu yang kompleks dan dirancang ulang bentuk sudunya berdasarkan prinsip hubungan linier (Sudarsono, 2013) :

$$c = \frac{8\pi r \cos \phi}{2N\lambda_r} \quad (2.28b)$$

#### 2.4.5 Teori Elemen Bilah

Elemen bilah dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (Hansen, 2008) :

$$a = \frac{1}{\frac{\sin^2 \phi}{\sigma(C_L \cos \phi + C_D \sin \phi)} + 1} = \frac{1}{\frac{4\sin^2 \phi}{\sigma C_N} + 1} \quad (2.29)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{\sin^2 \phi}{\sigma(C_L \sin \phi - C_D \cos \phi)} - 1} = \frac{1}{\frac{4\sin^2 \phi}{\sigma C_\tau} - 1} \quad (2.30)$$

Dalam beberapa kasus untuk menyederhanakan perhitungan,  $C_d$  bisa diabaikan tanpa mempengaruhi perhitungan (Qiyue Song, 2012). Maka dua persamaan diatas menjadi,



$$a = \frac{1}{\frac{4 \sin^2 \phi}{\sigma C_L \cos \phi} + 1} \quad (2.31)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \sin \phi \cos \phi}{\sigma C_L \cos \phi} - 1} \quad (2.32)$$

Dengan  $a$  adalah penurunan kecepatan yang terjadi pada saat kecepatan fluida menumbuk baling – baling,  $a'$  adalah faktor induksi anguler atau tangensial.

## 2.5 Perancangan Bilah

Perancangan Bilah dimulai dengan menentukan kapasitas energi listrik maksimal yang akan dapat dihasilkan oleh kincir, penentuan ini berdasarkan pada kebutuhan masing-masing pendisain. Sistem Kincir angin adalah satu kesatuan sistem dimana dalam pendesaianan kincir angin harus terdapat kesinambungan antara bilah, transmisi, generator, dan controller. Salah satu kesinambungannya adalah saling mengetahui efisiensi masing-masing. Dalam kasus ini efisiensi transmisi, generator, dan controller diasumsikan sudah ada, sedangkan efisiensi bilah akan ditentukan.

Sebagai salah satu referensi, efisiensi bilah maksimum adalah 59% atau lebih dikenal dengan istilah Betz Limit. Namun dari hasil literatur efisiensi bilah berkisar di 15% (Tipe Holland) sampai 40% (Tipe Propeller). Dengan mengasumsikan awal efisiensi bilah, dimana efisiensi komponen lainnya juga sudah diketahui, maka efisiensi kincir angin dapat diketahui dengan rumus (LAN,2015) :

$$K = \eta_{bilah} \times \eta_{transmisi} \times \eta_{generator} \times \eta_{kontrol} \quad (2.33)$$

Dengan  $K$  adalah efisiensi sistem,  $\eta_{bilah}$  adalah efisiensi bilah,  $\eta_{transmisi}$  adalah efisiensi transmisi,  $\eta_{generator}$  adalah efisiensi transmisi dan  $\eta_{kontrol}$  adalah efisiensi Kontrol.

Setelah mengetahui efisiensi sistem kincir angin dan sebelumnya telah menentukan energi listrik yang ingin dihasilkan, barulah dapat diperkirakan energi angin yang dibutuhkan yaitu dengan rumus (LAN,2015) :



$$W_a = \frac{W_e}{K} \quad (2.34)$$

$$W_a = \frac{1}{2} \rho A v_{\max}^3 \quad (2.35)$$

Dengan  $W_a$  adalah kapasitas energi listrik,  $W_e$  adalah kapasitas energi listrik,  $\rho$  adalah densitas udara,  $A$  adalah luas sapuan,  $v_{\max}$  adalah kecepatan angin maksimum. Kemudian untuk mencari jari-jari bilah, maka persamaan 40 menjadi:

$$\frac{2W_a}{\rho v_{\max}^3} = A \quad (2.36)$$

$$R = \sqrt{\frac{A}{3.14}}$$

Dengan  $R$  adalah jari-jari bilah. Selanjutnya dilakukan penentuan parameter geometri bilah untuk melakukan simulasi Qblade (LAN,2015) :

- Dalam mendesain bilah airfoil, perlu ditentukan twist ( $\beta$ ) pada setiap elemen bilah seperti pada gambar di atas. Cara untuk menentukan twist adalah dengan menentukan flow angle ( $\phi$ ) masing-masing elemen dan sudut serang masing-masing elemen ( $\alpha$ ).
- Flow Angle masing-masing elemen didapat dari rumus:

$$\phi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda_r} \quad (2.37)$$

- $\lambda_r$  = perbandingan kecepatan linear elemen bilah terhadap kecepatan angin pada elemen 1,2,3..... 20 yang berbeda beda, dengan  $r$  adalah jarak setiap elemen dan  $R$  adalah jari-jari bilah

$$\lambda_r = \frac{r}{R} \lambda \quad (2.38)$$

- Kemudian kembali lagi pada twist. Twist bisa didapat dengan persamaan

$$\beta = \phi - \alpha \quad (2.39)$$

- Setelah menentukan twist, geometri penting lainnya dari bilah adalah lebar bilah (chord). Chord ini harus ditentukan di masing-masing elemen bilah, dengan rumus:



$$C_r = \frac{16\pi R \left(\frac{R}{r}\right)}{9\lambda^2 B C_L} \quad (2.40)$$

Dengan  $C_r$  adalah chord,  $\lambda$  adalah nilai Tip speed ratio,  $R$  adalah jari-jari bilah,  $B$  adalah jumlah bilah,  $r$  adalah jarak setiap elemen dan  $C_L$  adalah Koefisien angkat.

## 2.6 Kayu

Kayu sebagai hasil hutan sekaligus hasil sumber kekayaan alam, merupakan bahan mentah yang mudah diproses untuk dijadikan barang sesuai dengan kemajuan teknologi. Kayu memiliki sifat istimewa, karena tidak dapat ditiru oleh bahan-bahan lain. Kayu dapat didefinisikan sebagai suatu bahan, yang diperoleh dari hasil pemungutan pohon-pohon di hutan, sebagai bagian dari suatu pohon. Dalam hal pengolahannya lebih lanjut, perlu diperhitungkan secara cermat bagian-bagian kayu manakah yang dapat lebih banyak dimanfaatkan untuk suatu tujuan tertentu. Ditilik dari tujuan penggunaannya, kayu dapat dibedakan atas kayu pertukangan, kayu industri, dan kayu bakar (J. F. Dumanou, 2001).

Pengolahan kayu tidak saja dimanfaatkan untuk properti bangunan serta sebagai bahan furniture tetapi dapat dimanfaatkan untuk keperluan teknologi seperti sebagai bahan dasar dari teknologi arang aktif, serta ter dan getah dapat digunakan sebagai bahan pelapis lambung kapal, dahulu kala kayu digunakan sebagai bilah kincir angin untuk mengairi persawahan, dewasa ini kayu telah dikembangkan sebagai bahan dasar pembuatan bilah pada kecepatan rendah seperti pada penelitian sudarsono (2013) yang memanfaatkan kayu segon laut (*Albizia Falcata*) sebagai bahan dasar pembuatan bilah wind turbine.

Kegunaan kayu dalam pengolahannya sebagai bahan material, bahan furniture dan pengolahan kayu sebagai bilah kincir angin tergantung pada jenis dan sifat – sifat kayu tersebut. Sehingga bahan olahan kayu dapat menghasilkan produk yang berkualitas dan memenuhi standar tertentu, kayu memiliki 2 sifat utama yaitu sifat fisik dan sifat mekanik (John Stefford dan kawan 1989, J. F. Dumanou, 2001).



### 2.6.1 Sifat Fisik Kayu

Berat jenis merupakan petunjuk penting bagi aneka sifat kayu. Makin berat kayu itu, umumnya makin kuat pula kayunya. Semakin ringan suatu jenis kayu, akan berkurang pula kekuatannya. Berat jenis ditentukan antara lain oleh tebal dinding sel, dan kecilnya rongga sel yang membentuk pori-pori. Sifat-sifat fisik kayu meliputi:

- a. Berat jenis Kayu memiliki berat jenis 0,2 s.d. 1,28. Berat jenis merupakan petunjuk penting terhadap sifat-sifat kayu. Semakin tinggi berat jenis kayu, semakin kuat kayu tersebut. Berat jenis kayu diukur berdasarkan berat kayu kering. Berat jenis juga menentukan kekerasan dan berat kayu.
- b. Keawetan alami Keawetan alami adalah daya tahan kayu terhadap serangga dan unsur-unsur perusak kayu. Keawetan kayu diukur dalam waktu tahunan. Keawetan alami disebabkan adanya zat ekstrat (zat racun) dari perusak kayu. Zat ekstratif terbentuk pada saat kayu gubal berubah menjadi kayu teras. Kayu teras tidak mengandung zat makanan dan zat ekstratif sehingga kayunya lebih awet.
- c. Warna kayu Warna kayu dipengaruhi oleh zat pengisi warna dalam kayu. Warna kayu dipengaruhi oleh: a). tempat dalam batang b). umur pohon c). kelembaban udara. Semakin dalam, semakin tua, dan semakin kering maka warna kayu akan semakin gelap.
- d. Higroskopis Kelembaban kayu dipengaruhi oleh kelembaban dan suhu udara sekeliling. Semakin lembab udara sekitar, semakin tinggi kelembaban kayu, karena kayu dapat menyerap dan melepaskan air sesuai kondisi kelembaban sekeliling.
- e. Tekstur merupakan ukuran relatif dari serat-serat kayu. Tekstur kayu dibedakan: a) Tekstur halus, b) Tekstur sedang, c) Tekstur kasar. Serat kayu menunjukkan arah dan umur sel-sel kayu. Kayu dikatakan berserat lurus apabila arah sel sejajar dengan sumbu batang, sedangkan sel-sel yang menyimpang dengan sumbu batang dinamakan serat mencong.

### 2.6.2 Sifat Mekanik Kayu

Sifat mekanik merupakan kemampuan untuk menahan muatan dari luar. Kekuatan-kekuatan tersebut antara lain:



- a. Kekuatan tarik Kekuatan tarik merupakan kekuatan kayu untuk menahan daya tarik. Kekuatan tarik terbesar pada kayu adalah sejajar dengan arah serat. Sedang kekuatan tarik terendah pada posisi tegak lurus arah serat.
- b. Kekuatan tekan Kekuatan tekan adalah kemampuan kayu untuk menahan tekanan. Kekuatan tekan tegak lurus serat pada semua jenis kayu lebih kecil daripada tekanan sejajar arah serat.
- c. Kekuatan geser Kekuatan geser adalah kemampuan kayu menahan beban geser. Beban geser adalah beban yang membuat bagian kayu tergeser. Kekuatan geser arah serat lebih besar daripada tekanan geser sejajar serat.
- d. Kekuatan lengkung Kekuatan lengkung adalah kekuatan untuk menahan gaya/beban yang mengakibatkan melengkungnya kayu.
- e. Keuletan Keuletan kayu adalah kemampuan kayu untuk menahan kejutan atau tegangan berulang-ulang akibat beban. Kayu tidak akan langsung patah, tetapi akan patah secara berangsur-angsur dan memberi suara peringatan tentang kerusakan yang terjadi.
- f. Kekuatan belah Kekuatan belah adalah kemampuan kayu untuk menahan beban yang berusaha membelah kayu. Kayu mudah terbelah disepanjang jari-jari (arah radial) arah lingkaran tahun. Kayu yang mudah terbelah hanya baik untuk kayu bakar, sedangkan kayu berkekuatan belah tinggi baik sekali untuk ukiran/patung.

## 2.7 Kayu Mahoni (*Swietenia macrophylla*)

Mahoni termasuk pohon besar dengan tinggi pohon mencapai 35–40 m dan diameter mencapai 125 cm. Batang lurus berbentuk silindris dan tidak berbanir. Kulit luar berwarna coklat kehitaman, beralur dangkal seperti sisik, sedangkan kulit batang berwarna abu-abu dan halus ketika masih muda, berubah menjadi coklat tua, beralur dan mengelupas setelah tua. Berikut sifat fisis kayau Mahoni (Martawijaya dan kawan, 2005):

- a. Sifat fisis
 

Berat jenis dan kelas kuat	
<i>S. macrophylla</i>	0.61 (0.53-0.67); II III



Penyusutan sampe kering udara untuk *S. macrophylla* 0.9% (R) dan 1.3% (T), sedangkan sampai kering tanur 3.3% (R) dan 5.7% (T)

(dimana R adalah radial, dan T adalah tangensial)

b. Sifat mekanik

Tegangan pada batas proporsi (kg/cm <sup>2</sup> )	b 282	k 339
--	-------	-------

Tegangan pada batas patas (kg/cm <sup>2</sup> )	b 516	k 590
---	-------	-------

Modulus elastitas (1000 kg/cm <sup>2</sup> )	b 81	k 91.8
--	------	--------

Usaha sampai batas proporsi (Kgm/dm <sup>3</sup> )	b 0.6	k 0.6
--	-------	-------

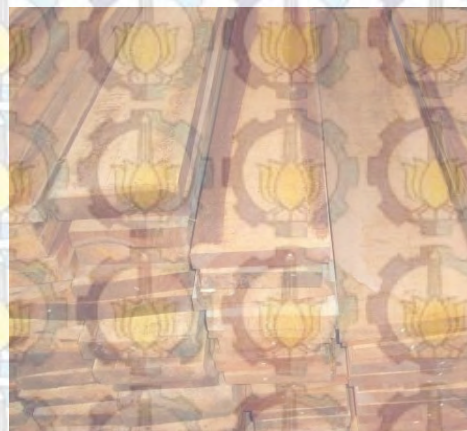
Ketanguhan belah Radial (kg/cm)	b 49.2	k 51.5
---------------------------------	--------	--------

Ketanguhan belah Tangensial (kg/cm)	b 60.2	k 59.3
-------------------------------------	--------	--------

Ketanguhan Tarik tegak lurus arah serat Radial (kg/cm)	b 36.1	k 46.3
--	--------	--------

Ketanguhan Tarik tegak lurus arah serat Tangensial (kg/cm)	b 39.1	k 47.9
--	--------	--------

Keterangan b = basah, k = kering,



Gambar 2.16 Pohon dan kayu agathis (Sumber <http://jawarafurniture.com/>)

## 2.8 Kayu Pinus (*Pinus merkusii*)

Terdapat lebih dari 20 jenis kayu pinus dengan nama species yang berbeda.

Jenis kayu pinus yang sering digunakan dan secara umum dikenal memiliki kualitas yang baik ada 2 jenis kayu pinus yaitu Pinus Radiata dan Pinus Merkusii, berikut sifat fisis dan mekanis kayu Pinus (*Pinus merkusii*) (Nurwati Hadjib, 2009).



a. Sifat fisis

Kerapatan Kayu Pinus	0.57 (0.36 – 0.85 )
Berat jenis normal basah	0.48 (0.31 – 0.68)
Kadar air basah	103.53 % (43.96 – 222.88%)
Kadar air kering udara	12.99 % (9.84 – 18.68 %)
Kadar air titik jenuh serat	17.03 (8.07 – 28.42 %)

b. Sifat mekanik

Sifat mekanik kayu pinus tersaji pada tabel berikut :

Tabel 2.1. Nilai rata-rata sifat mekanis kayu pinus pada umur pohon 21 Thn dengan 11 jumlah sampel. (Nurwati Hadjib, 2009)

	Ketahanan lentur statis (kg/cm <sup>2</sup> )		Ketahanan Tekan Serat (kg/cm <sup>2</sup> )	Kekerasan (kg/cm <sup>2</sup> )		
	MOE	MOR		Ujung	Sisi (R)	Sisi (T)
sd	13300.01	74.47	75.13	70.74	76.13	73.06
min	35859.97	414.38	211.88	210.50	156.50	151.00
max	77239.84	653.57	455.35	474.50	411.00	395.50

Keterangan: MOE = modulus elastisitas (Modulus of elasticity); MOR=:tegangan lentur patah (modulus of rupture); R = radial; T = tangensial, Sd =standard deviasi (standard deviation).



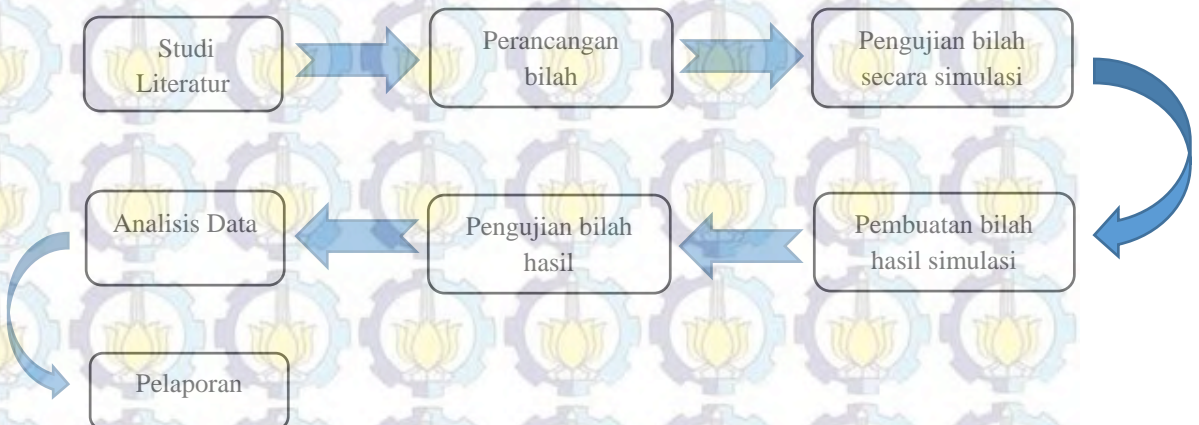
Gambar 17. Pohon pinus (<http://wahanaguru.blogspot.com>)



## BAB 3 METODOLOGI

### 3.1 Tahap – Tahapan Penelitian

Dalam penelitian ini akan dilakukan design bilah kincir angin menggunakan softwer QBlade yang akan digunakan untuk menentukan NACA airfoil yang digunakan dalam pembuatan bilah dengan bahan dasar jenis kayu Mahoni (*Swietenia macrophylla*) dan kayu Pinus (*Pinus merkusii*), Pembuatan bilah dilakukan meggunakan mesin cnc, setelah bilah usai diproduksi bilah tersebut akan diuji coba secara langsung di Desa Ciheres tepatnya di Lentera Angin Nusantara. Adapun tahapan pelaksanaan penelitian ini tampak seperti pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Skema Tahapan Penelitian

### 3.2 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian antara lain Laptop Core i5, Alat Perlengkapan Tukang, Anemometer, Generator tipe *3-phase permanent magnet* dengan putaran maksimum 1000 rpm, Ekor turbin angin (Fin) tipe sirip hiu, Kontroller, Data logger angin, Data logger Tegangan dan Arus, Baterai, dan Inverter. Bahan yang akan digunakan dalam penelitan ini adalah kayu Mahoni (*Swietenia macrophylla*) dan kayu Pinus (*Pinus merkusii*), Almunium foil, cat, Bor, amplas, dan lem kayu.



### 3.3 Prosedur Kerja

Dalam penelitian ini akan dikembangkan pembuatan bilah kincir angin pada kecepatan angin rendah (kurang dari 10 m/s) dengan melakukan simulasi penentuan NACA airfoil yang akan digunakan dengan cara menentukan jenis NACA yang terbaik antara NACA seri 4412 dan 4415 dengan simulasi parameter NACA tersebut. Setelah didapatkan NACA seri yang terbaik, selanjutnya dilakukan pembuatan bilah berdasarkan data NACA airfoil yang telah ditentukan.

Material yang akan digunakan dalam pembuatan bilah adalah material jenis kayu Mahoni (*Swietenia macrophylla*) dan kayu Pinus (*Pinus merkusii*). Selanjutnya bilah yang telah dibuat akan diuji coba dengan cara mengaplikasikan bilah hasil design tersebut pada kincir angin jenis HAWT yang terdapat di ciheres tepatnya di Lentera Angin Nusantara, pemilihan tempat tersebut dikarenakan telah terlebih dahulu melakukan penelitian mengenai kincir angin yang memiliki standar pembuatan bilah serta pembuatan kincir angin secara keseluruhan. Prosedur kerja pada penelitian ini dibagi menjadi tiga, yaitu perancangan bilah secara simulasi, pembuatan bilah hasil simulasi dan percobaan bilah. Masing-masing prosedur tersebut diuraikan sebagai berikut:

#### 3.3.1 Perancangan Bilah

Bilah kincir angin yang akan digunakan didesign terlebih dahulu untuk menentukan parameter yang akan digunakan sebagai dasar pembuatan bilah, parameter awal bilah ditentukan dengan menggunakan persamaan 2.30 – 2.40. Penentuan parameter awal dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *microsoft excel 2010*, dengan asumsi energi yang diinginkan sebesar 1kW dan bilangan reynold yang digunakan  $Re = 1000000$  (Y Daryanto, 2010), bilah didesign menggunakan program QBlade v.09 yang dapat diunduh secara gratis. Untuk kecepatan angin rendah (1-12 m/s) menggunakan airfoil NACA (*The United States National Advisory Committee for Aeronautics*) 4412 dan 4415 akan dimodifikasi menjadi jenis taper dan taperless.



Perbandingan simulasi bilah NACA 4412 dan 4415 untuk kedua jenis bilah dilakukan dengan menggunakan parameter BEM (*Blade Element Momentum*). Hasil simulasi kinerja rotor turbin untuk jenis bilah taper dan taperless berupa perbandingan  $Cl$  (*Coefficient Lift*) terhadap sudut serang (*Angle of Attack*), perbandingan TSR (*Tip speed Ratio*) terhadap  $Cp$  (*Coefficient Performance*). Simulasi daya dilakukan untuk melihat performa dari NACA 4412 dan 4415 pada kedua jenis bilah dengan kecepatan angin pengujian bernilai 1 – 12 m/s dengan kecepatan putaran generator sebesar 1000 rpm, setelah dilakukan simulasi selanjutnya dilakukan perbandingan hasil terhadap kedua jenis airfoil NACA 4412 dan NACA 4415 untuk kedua jenis bilah taper dan taperless.

### 3.3.2 Pembuatan Bilah Hasil Simulasi

Perancangan Bilah dilakukan dengan bahan dasar kayu Mahoni (*Swietenia macrophylla*) dan kayu Pinus (*Pinus merkusii*), kayu tersebut dirancang dengan menggunakan airfoil terbaik dari hasil simulasi. Setelah didapatkan desain terbaik kemudian dilakukan pembuatan gambar 3D menggunakan solidwork, tahapan pembuatan gambar 3D adalah sebagai berikut (LAN, 2015):

a. Persiapan data koordinat bilah

Koordinat data bilah merupakan hasil terbaik antara NACA 4412 atau NACA 4415 dapat diunduh pada program Qblade (koordinat tidak memiliki satuan), selanjutnya koordinat data diolah menggunakan MS excel.

b. Pengolahan koordinat bilah menggunakan MS excel

Koordinat yang berasal dari Qblade hanya memiliki koordinat x dan y koordinat x dan y baiknya dikalikan dengan 100 satuan agar mempermudah perhitungan, selanjutnya tambahkan koordinat z (bernilai nol untuk semua kolom), selanjutnya kurangi koordinat z dengan jarak antara element, pengurangan dilakukan sebanyak jumlah elemen desain.

c. Penyimpanan koordinat bilah

Setelah koordinat x, y dan z telah didapatkan data diexport pada program notepad karena program Solidwork hanya dapat mengimput data dengan format .txt



d. Perhitungan ukuran elemen bilah

Setelah dilakukan pengimputan koordinat kedalam program solidwork perlu penyesuaian ukuran desain, ukuran desain berupa lebar chord dan sudut twist. Perubahan yang sering terjadi pada lebar chord oleh sebab itu dilakukan penyesuaian chord pada masing-masing elemen dapat menggunakan persamaan berikut :

$$Chord = \frac{Cl}{\cos \beta} \quad (3.1)$$

Dengan Cl adalah koefisien lift dan  $\beta$  adalah sudut twist

Setelah gambar 3D usai dibuat selanjutnya dilakukan pembuatan menggunakan mesin cnc, bahan yang digunakan telah disediakan oleh perusahaan pembuatan bilah tersebut.

### 3.3.3 Pengujian Bilah

Pengujian bilah dilakukan di daerah ciheres tepatnya Lentera Angin Nusantara, pengujian bilah berdasarkan pengujian langsung dengan menggunakan kicir angin yang terdapat di Lentera Angin Nusantara dengan kecepatan angin yang terdapat di daerah tersebut. Sebelum dilakukan pengujian bilah perlu dilakukan kesetimbangan bilah terlebih dahulu agar ketika pemasangan tidak terjadi turbulensi.

### 3.4 Analisis Data

Setelah dilakukan pengukuran baik secara simulasi maupun secara langsung data daya yang dihasilkan akan dianalisis untuk mengetahui kualitas desain bilah secara simulasi dan hasil simulasi yang telah diterapkan terhadap 2 jenis kayu, selanjutnya akan dilakukan perbandingan antara kedua jenis kayu tersebut sehingga didapatkan jenis kayu yang terbaik dalam penggunaannya untuk membuat bilah.



## RENCANA DAN JADWAL KERJA PENELITIAN

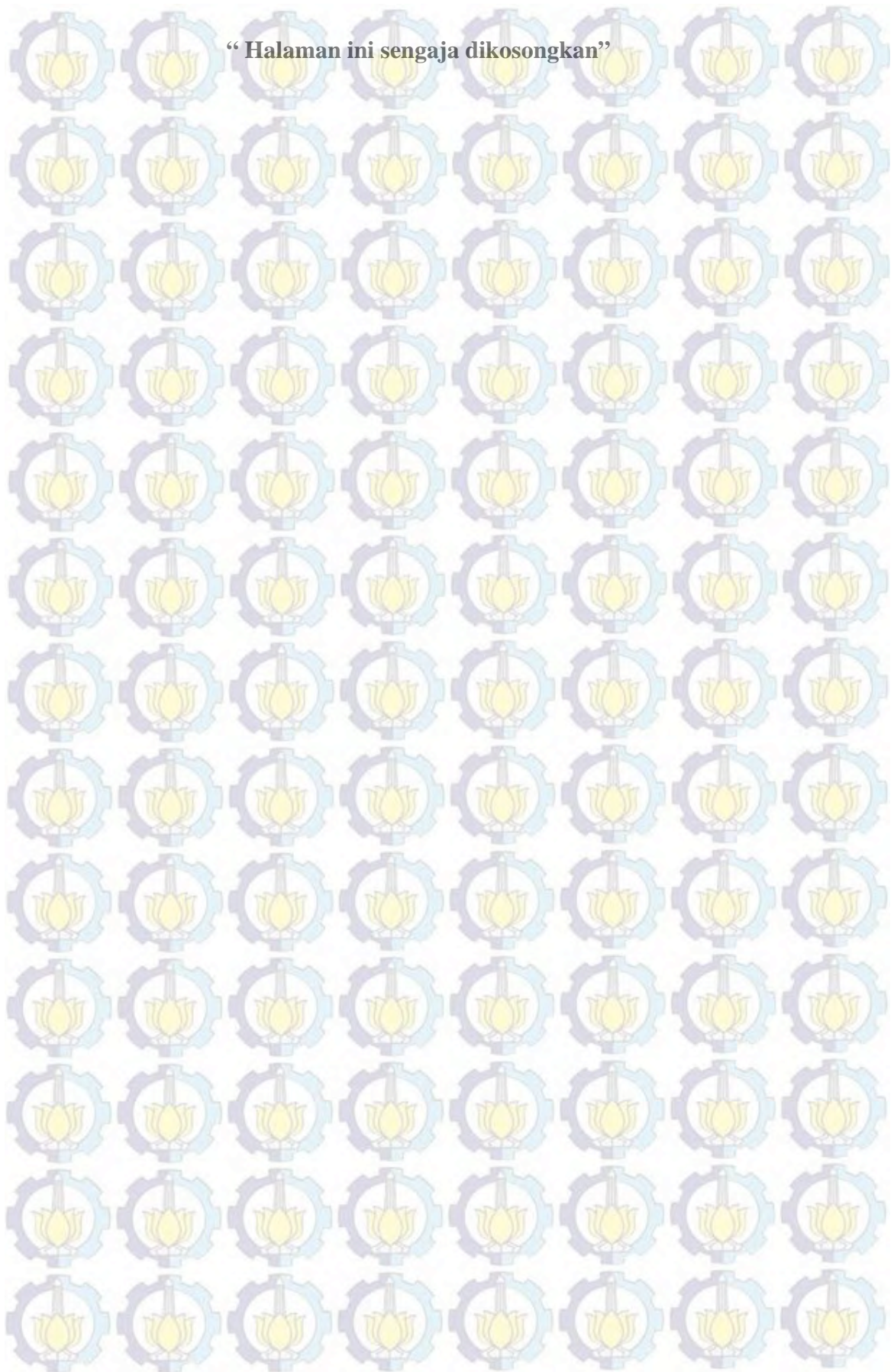
Kegiatan penelitian direncanakan berlangsung selama 13 bulan, dimulai bulan Juli 2014 sampai dengan Juli 2015 dengan rincian sebagaimana pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Rencana Kerja Penelitian

	2015 -2016											
	Januari	Februari	Maret	April	Mei	Juni	Juli	Agustus	September	Oktober	November	Desember
Studi Literatur												
Persipan Bahan												
Desain Bilah secara simulasi												
Ujian Proposal												
Pengujian bilah secara simulasi												
Pembuatan Bilah hasil modifikasi												
Pengujian Bilah Secara Langsung												
Analisis data												
Sidang Thesis												



“ Halaman ini sengaja dikosongkan”





## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Penentuan awal parameter bilah

Perancangan bilah dilakukan dengan menentukan parameter awal bilah yaitu berupa efisiensi sistem secara keseluruhan. Efisiensi sistem secara keseluruhan memiliki 4 hal penting berupa efisiensi bilah, efisiensi transmiter, efisiensi generator dan kontroler. T. Al Shemmeri, (2010) melaporkan bahwa energi yang dapat diekstrak dari angin oleh bilah adalah sebesar 59% atau disebut juga koefisien Betz ( $C_p$ ) sedangkan efisiensi *Transmitter*, *generator* dan *controler* memiliki nilai efisiensi yang berbeda untuk setiap alat yang digunakan. Pada penelitian ini nilai efisiensi *Transmitter*, *generator* dan *controler* merupakan nilai maksimum dari sistem pada kincir angin milik LAN (Lentera Angin Nusantara) yaitu sebesar 80% untuk setiap sistem. Efisiensi sistem total didapatkan dengan mengalikan efisiensi bilah, berdasarkan efisiensi peralatan yang dimiliki LAN efisiensi transmiter, efisiensi generator dan kontroler yang memberikan hasil efisiensi sistem kincir angin sebesar 30%.

Setelah mendapatkan efisiensi sistem selanjutnya kita menentukan kapasitas daya listrik yang diinginkan ( $W_e$ ) pada kecepatan angin maksimal 12 m/s adalah sebesar 1000 W, Energi angin yang dibutuhkan didapat dengan menggunakan persamaan 2.39 – 2.41 dengan hasil sebesar 3310 joule ( $W_a$ ). Penentuan panjang bilah berasal dari persamaan energi kinetik, memberikan hasil panjang bilah sepanjang 1 m ( $R$ ). Panjang bilah tersebut digunakan untuk mendesain bilah jenis airfoil NACA 4412 dan NACA 4415 dengan jenis bilah taper dan taperless. Data penentuan parameter panjang bilah tersaji pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Penentuan parameter panjang bilah

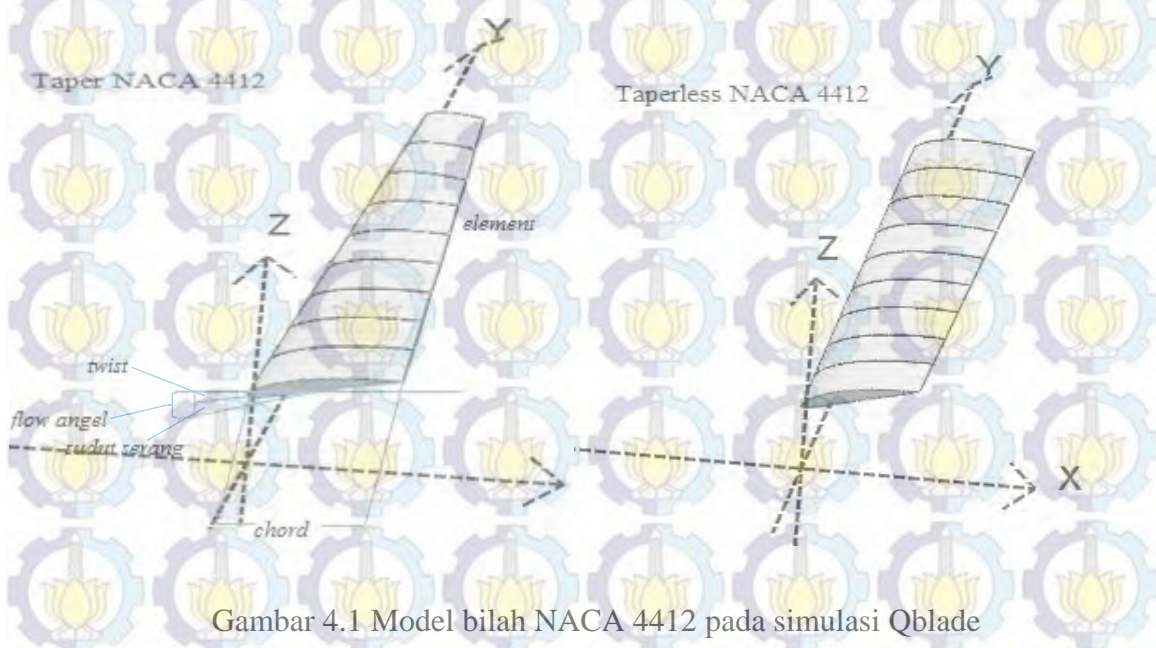
$W_e$	Efisienasi (%)					$W_a$	$V_{max}$ (m/s)	$R$ (m)
	Bilah	Transmitter	Generator	Controler	Total (K)			
1000	59	80	80	80	30	3310	12	1



## 4.2 Penentuan geometri bilah

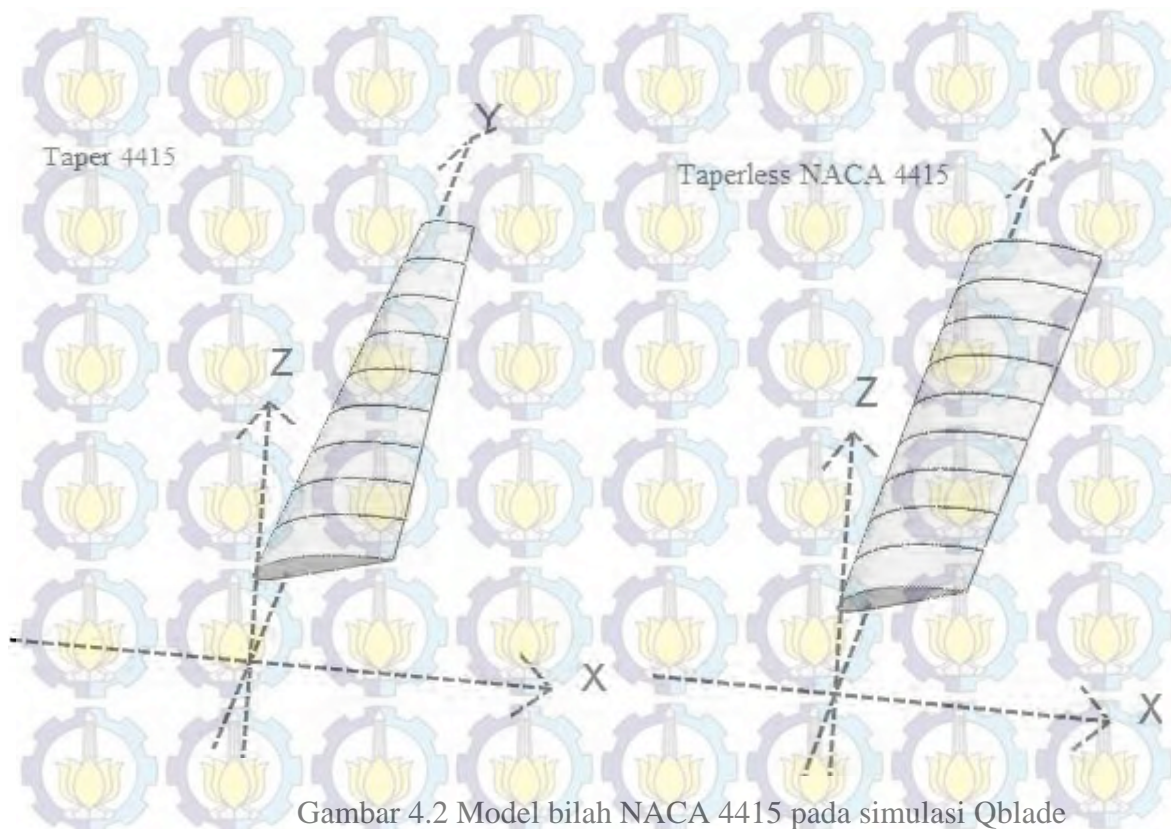
Sebelum melakukan penentuan geometri bilah pertama-tama harus menentukan sudut serang ( $\alpha$ ) dan *Lift Coefficient* ( $C_l$ ). Sudut serang adalah sudut datangnya tumbukan angin pada airfoil, sedangkan *lift coefficient* ( $C_l$ ) merupakan koefisien gaya angkat, gaya angkat harus lebih besar dari pada gaya tahan (*drag coefficient*) agar bilah dapat berputar. Nilai sudut serang dan lift coefficient didapatkan dari simulasi menggunakan perangkat lunak *Qblade v0.8*, hasil sudut serang dan lift coefficient bernilai berbeda untuk kedua jenis airfoil, airfoil NACA 4412 memiliki sudut serang bernilai  $6^\circ$  dan lift coefficient bernilai 1.12 sedangkan untuk NACA 4415 sudut serang bernilai  $6.50^\circ$  dan lift coefficient bernilai 1.18. selain sudut serang dan *lift coefficient*.

Parameter lain yang diperlukan dalam perancangan bilah adalah *Tip Speed Ratio* (TSR), TSR adalah perbandingan kecepatan angin terhadap kecepatan sudu, secara umum nilai TSR dipengaruhi oleh jumlah bilah yang digunakan, pada perancangan ini bilah yang digunakan sebanyak 3 buah, menurut Huge piggot (2003) nilai TSR pada bilah yang berjumlah 3 buah bernilai TSR antara 6-8, pada penelitian ini TSR yang digunakan bernilai 7. Hasil yang didapat dalam penentuan geometri bilah menggunakan parameter Sudut serang, *lift coefficient* dan nilai TSR untuk setiap jenis airfoil dan jenis bilah telah dilakukan pemodelan pada *Qblade*, hasil dari desain bilah dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan 4.2



Gambar 4.1 Model bilah NACA 4412 pada simulasi *Qblade*





Gambar 4.2 Model bilah NACA 4415 pada simulasi Qblade

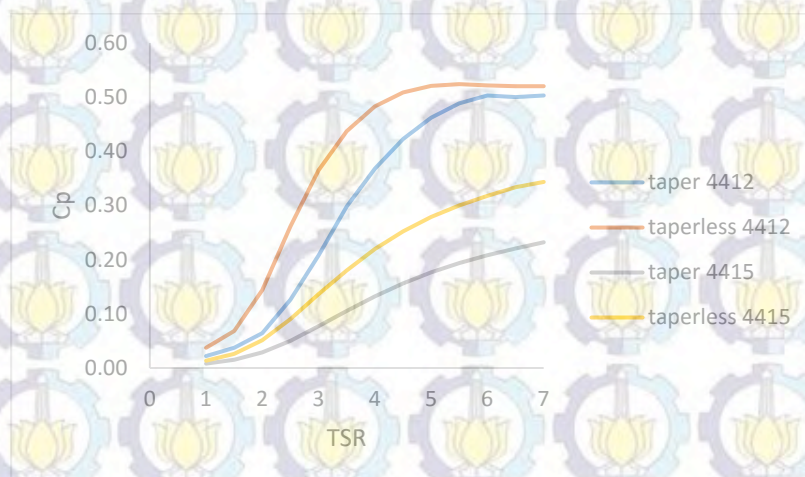
TSR parsial merupakan tip speed ratio setiap elemen bilah, Flow angel merupakan sudut datangnya aliran angin yang mengenai setiap elemen bilah, untuk setiap airfoil bilah dibagi menjadi 10 elemen, setiap elemen mengimplementasikan kejadian pada bilah tersebut. Karakteristik taper dan taperless pada airfoil NACA 4412 ataupun NACA 4415 memiliki geometri yang sama dengan karakteristik geometri taperless namun berbeda pada lebar chord. Taper cenderung bernilai semakin kecil pada ujung bilah sedangkan untuk taperless bernilai sama dari ujung hingga pangkal.

Perbedaan geometri airfoil NACA 4412 dan NACA 4415 terletak pada chord dan twist, untuk airfoil NACA 4412 mempunyai lebar chord lebih besar dari pada lebar chord airfoil NACA 4415 yaitu bernilai 97 mm berbanding 93 mm perbedaan ini terjadi dikarenakan perbedaan parameter *lift coefficient* , sedangkan sudut twist airfoil NACA 4415 bernilai lebih besar dari pada airfoil NACA 4412 Perbedaan ini terjadi dikarenakan perbedaan parameter sudut serang.



### 4.3 Simulasi Bilah

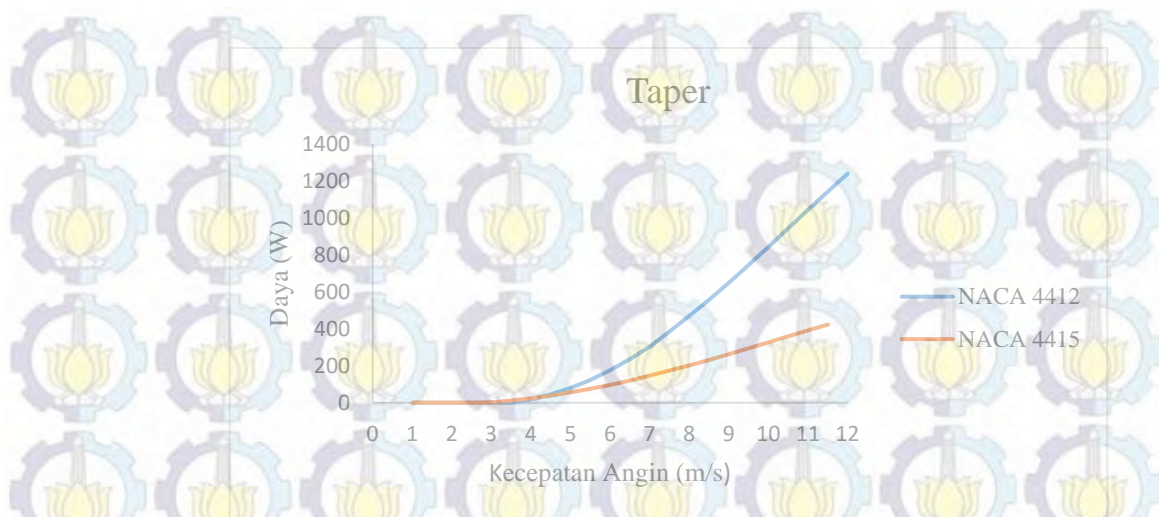
Setelah didapatkan panjang chord dan sudut twist selanjutnya dilakukan Simulasi Parameter BEM (*Blade Element Momentum*), salah satu hasil simulasi BEM adalah TSR (*Tip Speed ratio*) terhadap  $C_p$  (*Coefficient Performance*) yang paling optimal dari kedua airfoil NACA 4412 dan 4415 pada kedua jenis bilah. Hasil simulasi  $C_p$ -TSR tersaji pada Gambar 4.3. Berdasarkan hasil simulasi memberikan hasil bahwa Jenis bilah *Taperless* memiliki efisiensi  $C_p$  lebih baik bila dibandingkan dengan jenis bilah Taper untuk kedua jenis airfoil NACA 4412 dan 4415, namun airfoil NACA 4412 berjenis taper memiliki efisiensi 50% lebih tinggi bila dibandingkan dengan jenis bilah taperless NACA 4415 pada TSR 7 dengan nilai koefisien 34%. Koefisien tertinggi dimiliki taperless NACA 4412 pada TSR 7 dengan nilai koefisien 52%. Hasil simulasi  $C_p$ -TSR tersaji pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Perubahan nilai  $C_p$ -TSR

Untuk melihat performa desain bilah maka perlu dilakukan pengujian daya. Dengan mengasumsikan kecepatan maksimum generator sebesar 500 Rpm dengan kecepatan angin 1-12 m/s untuk setiap jenis airfoil dan setiap jenis bilah seperti tersaji pada Gambar 4.4 dan 4.5. Untuk jenis taper NACA 4412 pada kecepatan 4 m/s baru mulai menghasilkan daya sebesar 16.20 W, sementara pada jenis taper NACA 4415 didapat pada kecepatan 4 m/s adalah sebesar 23.09 W. Pada kecepatan maksimum (12 m/s), taper NACA 4412 mempunyai daya sebesar 1240.29 W sedangkan untuk taper NACA 4415 mempunyai daya sebesar 451.19 W.





Gambar 4.4 Simulasi daya bilah jenis taper

Dari Gambar 4.5, untuk jenis taperless NACA 4412 mulai menghasilkan daya pada kecepatan angin 4.50 m/s dengan daya sebesar 16.47 W sedangkan NACA 4415 telah menghasilkan daya pada kecepatan angin 3.50 m/s dengan daya sebesar 9.37 W dan daya 48.26 W pada kecepatan angin 4.50 m/s, kedua jenis bilah NACA 4415 menghasilkan daya pada kecepatan angin yang lebih rendah dengan daya yang lebih besar pada kecepatan angin yang sama ketika jenis NACA 4412 mulai menghasilkan daya tetapi kedua jenis baling-baling NACA 4412 memiliki kecenderungan peningkatan daya secara signifikan seiring bertambahnya kecepatan angin, sedangkan kedua jenis NACA 4415 memiliki kecenderungan meningkat secara bertahap, pada kecepatan maksimum kedua jenis bilah NACA 4412 mempunyai daya tiga kali lipat dari pada jenis bilah NACA 4415 seperti tersaji pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Simulasi daya bilah jenis taperless



Secara keseluruhan hasil Simulasi NACA 4412 lebih baik bila dibandingkan dengan NACA 4415 meskipun NACA 4412 membutuhkan energi awal yang lebih besar dari pada NACA 4415 untuk memutar bilah secara simulasi hal ini disebabkan daya angkat (coefficient Lift) NACA 4412 lebih kecil bila dibandingkan NACA 4415 yang bernilai 1.12 berbanding 1.18 pada . perbedaan daya angkat disebabkan perbedaan profil ketebalan antara NACA 4412 bernilai 12% dari profil airfoil sedangkan NACA 4415 bernilai 15% dari profil airfoil (*airfoil tool*, 2015). Selanjutnya untuk menentukan jenis bilah yang terbaik dapat tersaji pada Gambar 4.6.

Kedua jenis bilah memiliki karakteristiknya masing-masing, untuk jenis taper lebih dominan pada kecepatan angin 4-7 m/s dengan daya lebih besar dari pada jenis taperless, namun perbedaan daya tidak terlalu signifikan atau bernilai tidak jauh berbeda bila dibandingkan pada kecepatan angin 7-12 m/s, pada kecepatan 10 m/s mulai terjadi perbedaan yang signifikan untuk taper berdaya 841.45W dan taperless berdaya 941.98 W, sedangkan pada kecepatan maksimum 12 m/s taperless memiliki daya 1549.88 W dan taper memiliki daya 1235.31 W.



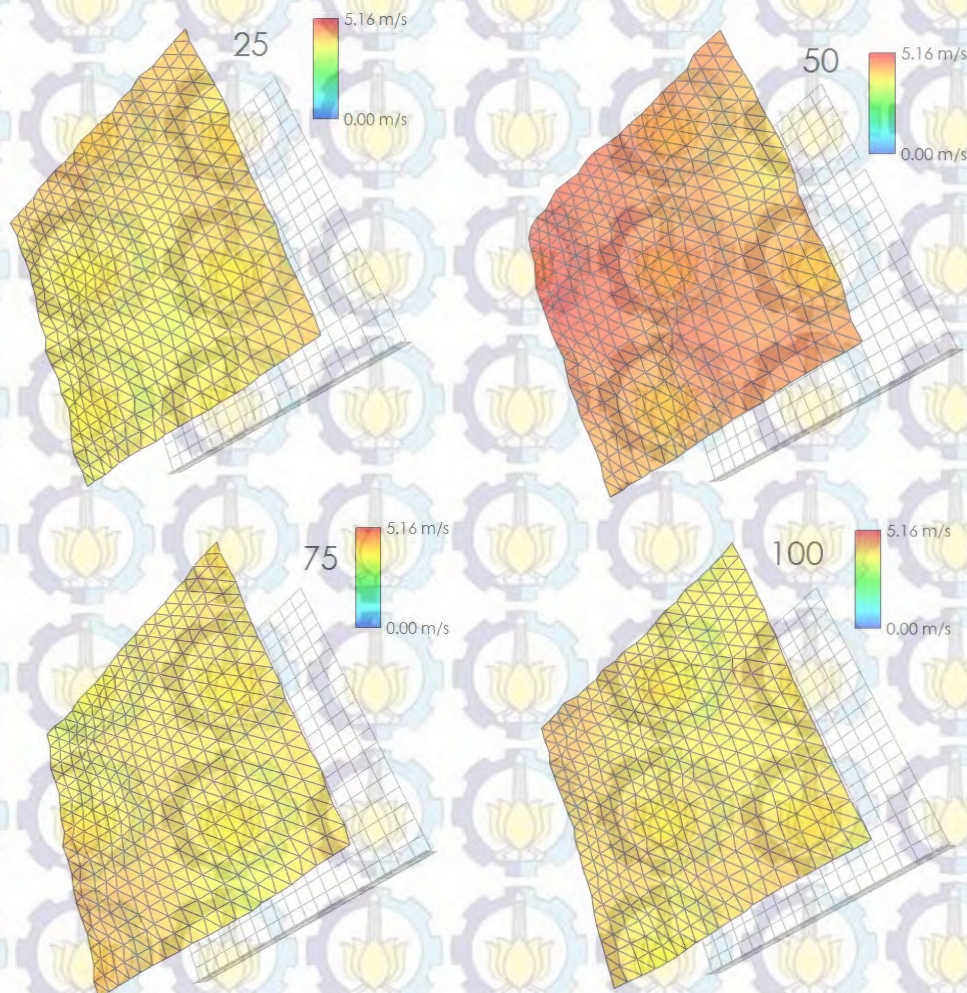
Gambar 4.6 Simulasi daya pada kedua jenis bilah

Perbedaan daya antara taper dan taperless disebabkan oleh luasan sapuan udara atau dengan kata lain perbedaan penyerapan energi angin menjadi energi kinetik, taperless memiliki luas sapuan yang lebih besar dibandingkan dengan jenis taper hal ini disebabkan oleh karakteristik taperless memiliki panjang chord bernilai



sama dari pangkal hingga ujung, kekurangan dari jenis bilah ini memerlukan kecepatan angin untuk perputaran awal lebih besar dari jenis taper dengan perbedaan 1 m/s, namun memiliki keuntungan dengan luas sapuan yang besar sanggup menangkap energi angin yang lebih banyak dari pada jenis taper ketika sedang berputar.

Pola distribusi kecepatan angin dapat dilakukan dengan menghitung kecepatan angin rata-rata pada suatu daerah, setelah didapatkan kecepatan angin dilakukan simulasi menggunakan perangkat lunak Qblade dengan indeks timestep 1 – 100 penyajian data seperti pada Gambar 4.7 digunakan nilai timestep 25,50,75 dan 100.



Gambar 4.7 Pola distribusi angin pada timestep 1 – 100 dengan turbulensi sebesar 10% untuk kecepatan angin rata-rata 4 m/s



#### 4.4 Proses Pembuatan Bilah

Pembuatan bilah menggunakan hasil simulasi terbaik yaitu jenis bilah Taperless NACA 4412. Untuk melakukan proses pembuatan dilakukan persiapan bahan-bahan yang akan digunakan yaitu kayu Mahoni dan kayu pinus. Dalam pemilihan bahan pembuatan bilah terutama yang berbahan dasar kayu perlu dicermati beberapa hal diantaranya umur kayu, aliran serat kayu dan kayu dalam keadaan kering (kadar air kurang dari 10%) (LAN,2014). Untuk kayu dengan kadar air kurang dari 10% dapat dicari di tempat pengolahan kayu mentah atau dapat meminta pada perusahaan kayu tersebut.

Pengerjaan pembuatan bilah menggunakan mesin CNC untuk mendapatkan persisi yang tinggi. Bilah akan dibuat berdasarkan gambar 3D solidwork seperti terlihat pada Gambar 4.8.

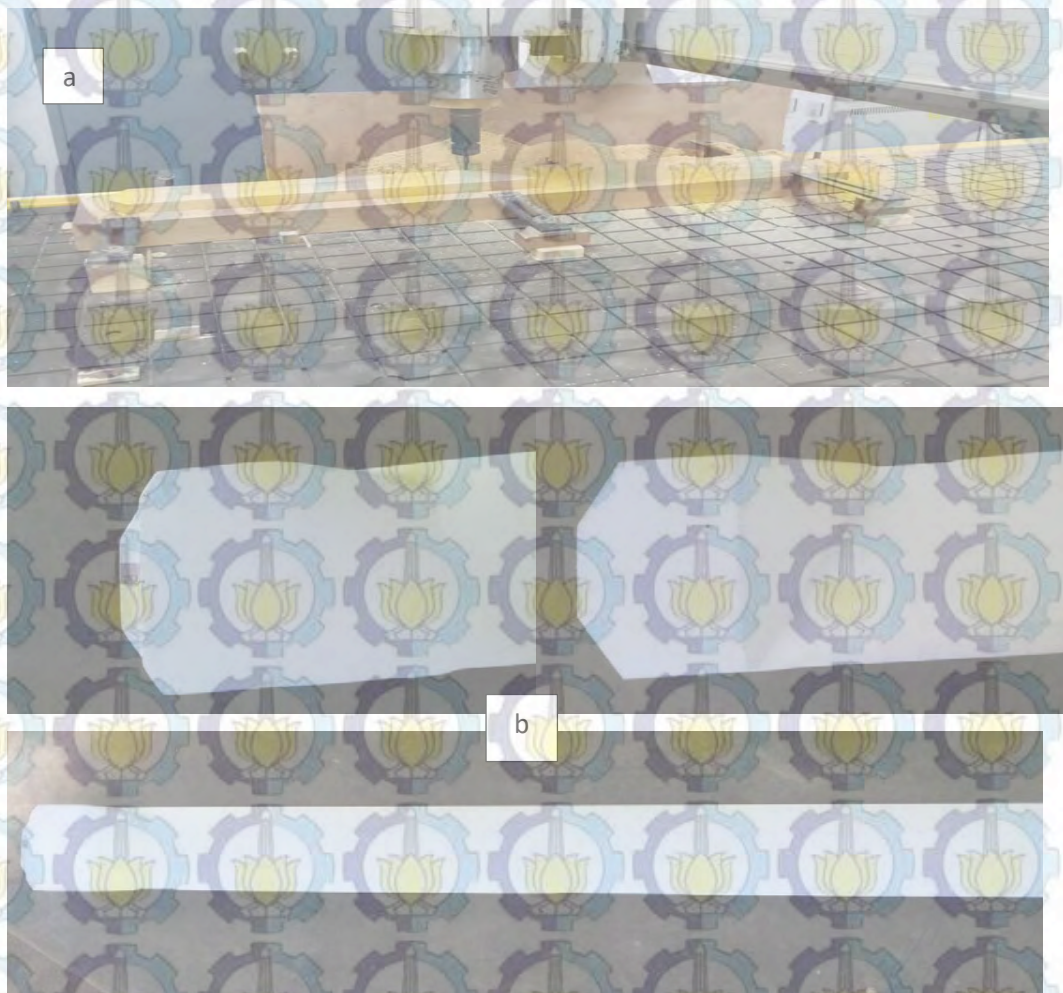


Gambar 4.8 Model 3D menggunakan Solidwork

Umur kayu yang terlalu muda memiliki kadar air yang tinggi sehingga pada proses pengeringan volume kayu akan berkurang, sedangkan pada umur kayu yang lebih tua atau siap panen memiliki kadar air setandar yaitu sebesar 15-20 % setelah proses kering angin (Budianto,1996) sehingga sebelum pengolahan kayu perlu dilakukan pengeringan oven agar mendapatkan kadar air yang dibutuhkan.



Proses pembuatan bilah dilakukan oleh CV. Rafi yang berada di Daerah Istimewa Yogyakarta menggunakan mesin CNC 4 Dimensi (Gambar 4.9a), dalam pengerjanya memakan waktu hingga 4 minggu dimana 2 minggu pertama digunakan untuk membuat prototipe, dan 2 minggu pembuatan dan finishing bilah. Prototipe dilakukan agar mengurangi dampak kerusakan pada saat pengerjaan, bahan yg digunakan untuk membuat prototipe merupakan bahan yang telah disediakan oleh perusahaan tersebut. Untuk proses finishing merupakan proses menghaluskan dan memberikan lapisan pada bilah, lapisan dasar berupa dempul kayu dan lapisan selanjutnya menggunakan cat yang tahan terhadap perubahan temperatur dan kelembapan. Hasil finishing dapat dilihat pada Gambar 4.9b.



Gambar 4.9 Proses pembuatan : a) Proses pembuatan menggunakan mesin CNC 4D pada salah satu sisi bilah dan b) Hasil Pembuatan Bilah



#### **4.5 Proses Pengujian**

Proses pengujian dilakukan di Lentera Angin Nusantara (LAN) yang berada di Desa Ciheras Kecamatan Cipatujah Tasikmalaya kota, perlengkapan pengujian berupa generator, kontroler dan batrai telah tersedia di LAN, proses pengujian dilakukan beberapa tahapan diantaranya Proses kesetimbangan bilah, pemasangan dan penurunan bilah pada kincir angin.

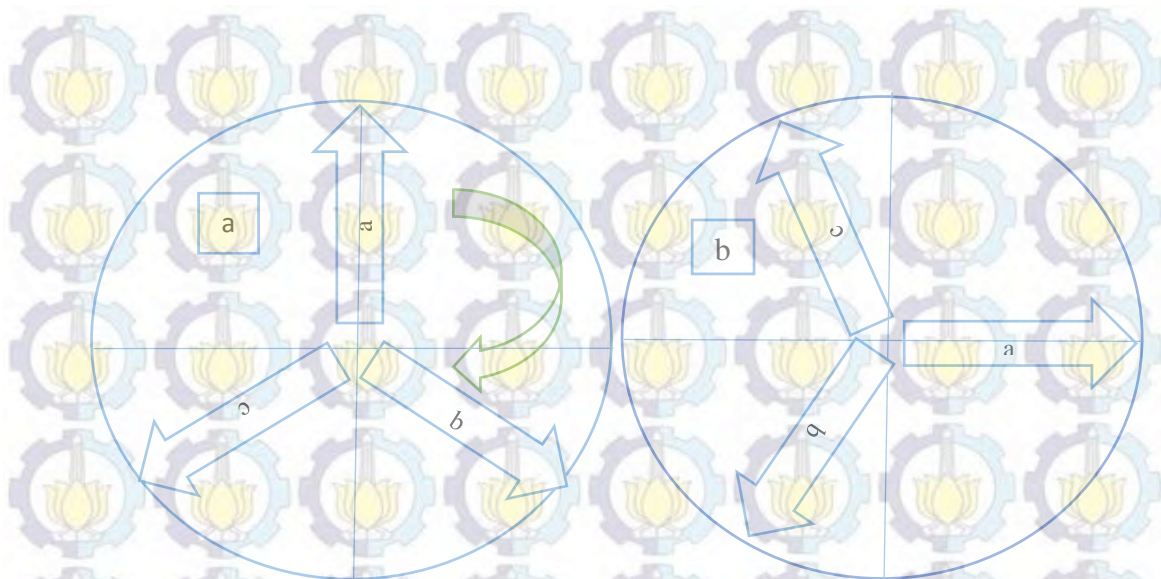
##### **4.5.1 Proses Keseimbangan**

Keseimbangan bilah merupakan salah satu faktor terpenting dalam pangujian bilah, jika suatu bilah tidak dalam keadaan setimbang pada saat sedang beroperasi dapat berakibat kincir angin mengalami getaran, getaran ini selain mengurangi efisiensi kincir angin juga mengakibatkan kerusakan pada kincir angin tersebut selain itu dapat menyebabkan kebisingan dan dapat membahayakan seseorang yang sedang melakukan pemasangan atau penurunan bilah dan pada keadaan yang ekstrim bilah akan patah dan merusak sistem kincir angin tersebut.

Bilah dikatakan setimbang bila ketika pemasangan bilah tersebut diputar dan diberhentikan pada titik manapun bilah tersebut akan langsung berhenti atau dapat dilihat secara langsung ketika bilah berhenti berputar pada keadaan tidak ada angin (kondisi pagi hari), untuk bilah yang setimbang ketika bilah berhenti tidak akan berada pada posisi yang sama pada hari yang berbeda, jika salah satu bilah berada pada posisi yang sama dalam beberapa hari maka dapat dikatakan bahwa bilah tersebut tidak dalam keadaan setimbang.

Bilah yang memiliki massa seragam belum bisa dikatakan setimbang hal ini disebabkan karena adanya penyebaran massa yang tidak merata pada element-element bilah tersebut dikarenakan kadar air yang tidak merata selain itu selama proses finishing pendempulan dan pengecatan dapat terjadi penumpukan dempul atau cat pada titik tertentu Sebagai contoh proses kesetimbangan dapat dilihat pada Gambar 4.10.





Gambar 4.10 Proses dan posisi kestimbangan pada bilah : a) Bilah dalam kondisi setimbang dan b) Posisi pengujian kesetimbangan bilah

Pada Gambar 4.10a adalah posisi ideal yang terjadi bila bilah telah dalam keadaan setimbang dimana tidak terjadi pergerakan pada semua bilah, ketika posisi bilah  $a$  digantikan dengan posisi bilah  $c$  dan tetap dalam keadaan diam maka dapat dikatakan bahwa bilah telah dalam keadaan setimbang. Namun bila posisi  $a$  digantikan dengan bilah  $b$  dan mengalami pergerakan maka bilah tidak dalam kondisi setimbang.

Jika dalam posisi Gambar 4.10b bilah  $a$  bergerak keatas dapat dikatakan bilah  $a$  lebih ringan dari pada bilah  $b$  dan  $c$  namun jika bilah  $a$  bergerak kebawah dapat dikatakan bilah  $a$  lebih berat dari pada bilah  $b$  dan  $c$  dan ketika bilah  $a$  dalam keadaan diam dapat dikatakan bilah setimbang dengan bilah  $b$  atau  $c$ , untuk menentukan kesetimbangan antara bilah  $a$  terhadap  $b$  atau  $c$  perlu diubah posisi bilah tersebut, jika bilah  $c$  menggantikan posisi bilah  $a$  dan bergerak kebawah ini menandakan bahwa bilah  $a$  tidak setimbang terhadap bilah  $c$  dan jika posisi  $a$  digantikan dengan posisi  $b$  hal yang terjadi adalah bilah akan diam hal ini menunjukan bilah  $a$  setimbang terhadap bilah  $b$ . Hal ini juga berlaku pada semua bilah untuk menentukan kesetimbangan bilah. Setelah dilakukan penentuan proses kesetimbangan kita dapat menentukan treatment untuk sistem dalam keadaan setimbang.



Jika bilah  $a$  lebih ringan dari pada bilah  $b$  maupun  $c$  kita dapat memberikan penambahan masa pada bilah  $a$  sampai pada keadaan setimbang, namun jika bilah  $a$  lebih berat dari pada bilah  $b$  dan  $c$  kita dapat melakukan pengurangan masa.

Ada dua hal yang dapat dilakukan ketika bilah tidak dalam keadaan setimbang :

a. Penambahan massa

Penambahan massa dapat dilakukan dengan memberikan massa tambahan pada bilah yang lebih ringan, penambahan dapat berupa penambahan benda lain (contoh aluminium, baut dan mur). Penambahan massa dipasangkan pada sisi belakang bilah untuk menghindari kontak langsung terhadap angin dan penambahan masa diberikan pada ujung bilah.

b. Pengurangan massa

Pengurangan massa dapat dilakukan dengan mengebor bagian-bagian tertentu pada bilah tersebut, setelah dilakukan pengeboran atau pengurangan massa perlu ditutup kembali agar tidak terjadi penambahan massa oleh air ataupun debu-debu.



Gambar 4.11 Proses kesetimbangan bilah yang dilakukan di Lentera Angin Nusantara



#### 4.5.2 Pengujian Bilah

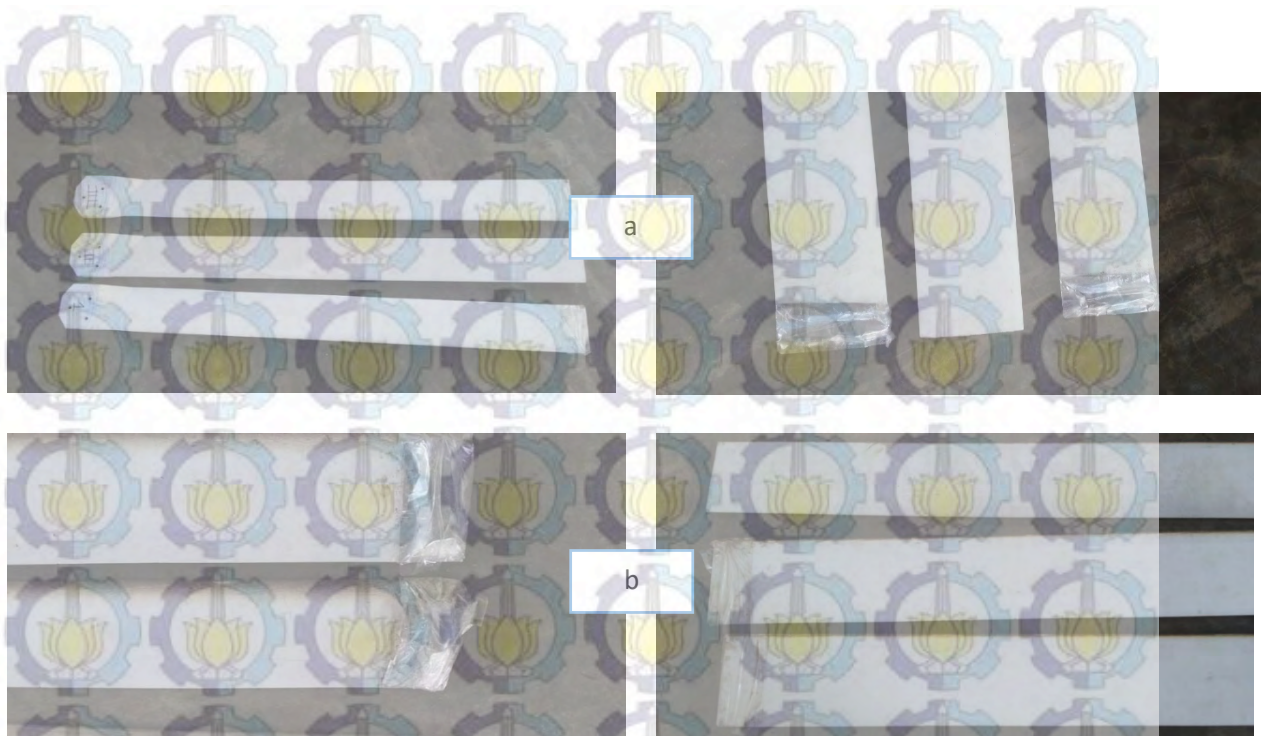
Proses pengujian (pemasangan) bilah dilakukan dipagi hari dimana kondisi angin kurang dari 3 m/s, atau dalam keadaan bilah berhenti berputar, jika pemasangan bilah dilakukan pada keadaan angin lebih dari 3 m/s akan berbahaya bagi keselamatan. Dalam pengerjaan pemasangan dan penurunan bilah ini perlu dilakukan dengan tingkat keamanan yang tinggi karena pemasanga bilah berada pada ketinggian diatas 5 m sedangkan kincir angin di LAN di pasang pada ketinggian 10 m. Pengujian dilakukan dengan spesifikasi sistem Kincir angin: tipe turbin HAWT (*Horizontal Axix Wind Turbine*), *maximum output power* 500 wp, tipe generator *3-phase permanent generator with cogging-less technology*, dengan jumlah bilah 3 buah.

##### 4.5.2.1 Pengujian Ketahanan Bilah

Proses pemasangan dan penerunan bilah dilakukan bersama staff LAN dan standar operasi pemasangan berdasarkan aturan LAN, pada Gambar 4.10. Tidak terjadi kerusakan yang berarti pada bilah namun kerusakan terjadi pada pelapis penambahan beban sehingg perlu ditingkatkan pelapis untuk melindungi bebab tersebut, pelindung bebabn menggunakan bahan almunium sehingga perlu dicari bahan lainya untuk tingkat safety yg lebih baik

Hasil pengujian bilah tersaji pada Gambar 4.12 dan Gambar 4.13, kondisi 1 merupakan kondisi awal sebelum pemasangan, kondisi 2 merupakan kondisi setelah pemasangan. Pada Gambar 4.12 tidak terjadi kerusakan pada bilah pinus, kerusakan terjadi pada perekat penambahan massa, sedangkan Gambar 4.13 untuk bilah mahoni setelah pengujian terjadi kerusakan pada salah satu bilah kayu mahoni kerusaakan berupa retakakan yang terjadi pada bagian pangkal. Karakteristik kayu mahoni yang memiliki massa jenis  $0.61 \text{ g/cm}^3$  ketika beroperasi beban yang dialami akibat tumbukan angin tidak mampu ditahan oleh salah satu bilah sehingga terjadi keretakan, sedangkan untuk kayu pinus memiliki massa jenis  $0.48 \text{ g/cm}^3$  lebih rendah dari pada kayu mahoni sehingga dapat menahan tumbukan angin terhadap bilah. Salah satu faktor penentuan bahan bilah adalah massa jenis, sedangkan faktor cuaca dapat diatasi dengan treatmen penguatan dari bahan cat yang digunakan untuk menambah ketahanan terhadap perubahan cuaca.





Gambar 4.12 Kondisi kayu pinus sebelum dan sesudah pemasangan : a) kondisi awal sebelum pemasangan dan b) kondisi setelah pemasangan



Gambar 4.13 Kondisi kayu Mahoni sebelum dan sesudah pemasangan a) kondisi awal sebelum pemasangan dan b) kondisi setelah pemasangan





Gambar 4.14 Pengujian ketahanan bilah di Lentera Angin Nusantara

#### 4.5.2.2 Pengujian Daya Bilah

Setiap bilah yang telah terpasang telah menghasilkan daya, daya yang dihasilkan bergantung pada kecepatan angin. Bilah yang telah di uji memberikan hasil yang berbeda pada hari yang berbeda Tabel 4.2 dan 4.3 adalah Tabel daya yang dihasilkan oleh bilah pinus dan bilah mahoni. Pengujian daya bilah menggunakan peralatan : Turbin angin type HAWT type TSD 500, Anemometer, Data logger angin, Kontroler, Data logger daya type Nedo2-04 dan Baterai 2V/800 Ah.



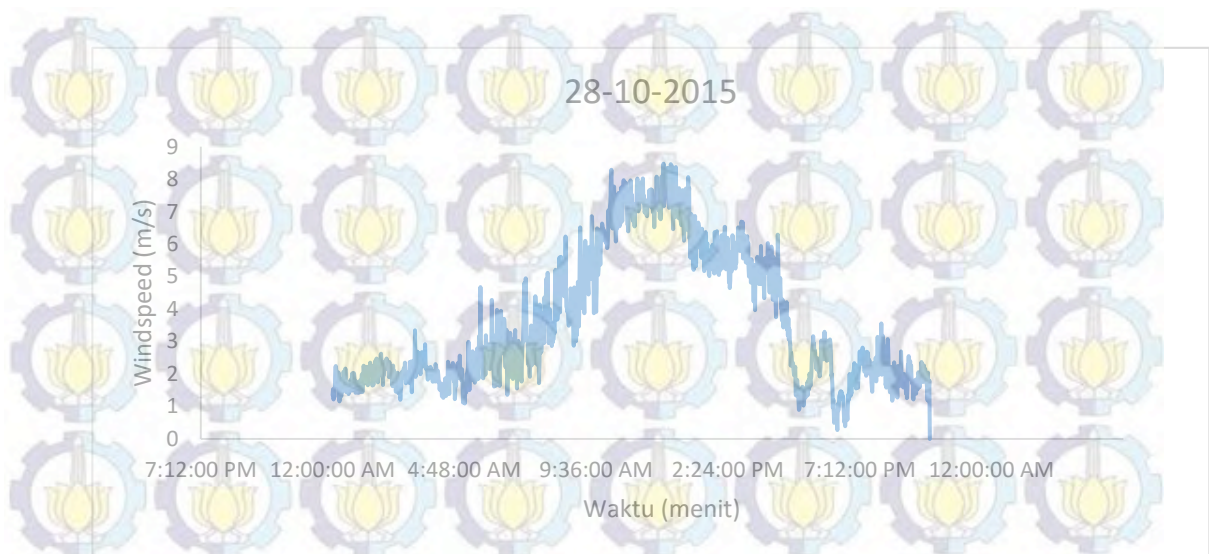
Kecepatan angin rata-rata pada saat bilah pinus sedang beroperasi bernilai 3.65 m/s namun memiliki kecepatan maksimum 9.64 m/s dengan daya sebesar 4443.77 wh dengan pengisian daya maksimum sebesar 254.29 W dan rata-rata pengisian daya sebesar 60.03 W. Bilah pinus dapat mengestrak energi angin sebesar 32.42% dengan daya yang dihasilkan sebesar 1440.65 wh.

Tabel 4.2 Hasil Pengolahan data kayu pinus

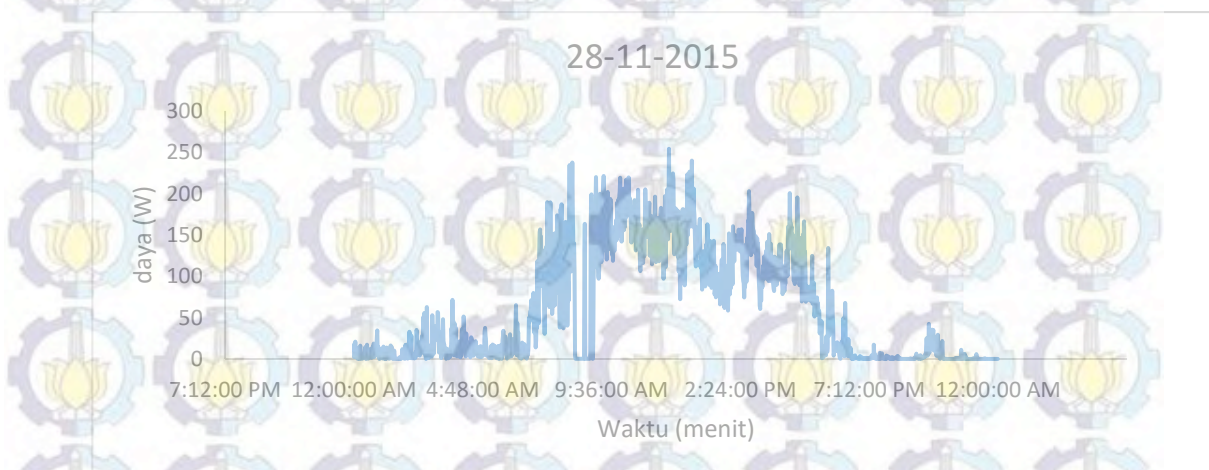
Tanggal		28-10-2015	30-10-2015	5-11-2015
Wind Measurement	Average Wind Speed	3.65 m/s	2.69 m/s	1.94 m/s
	Maximum Wind Speed	9.64 m/s	7.59 m/s	9.29 m/s
	Dominant Wind Direction			
	Teoritical Power	4443.77 Wh	2008.4 Wh	1013.62 Wh
Charging Measurement	Maximum Battery Voltage	26.87 Volt	26.26 Volt	25.75 Volt
	Minimum Battery Voltage	24.33 Volt	23.97 Volt	23.81 Volt
	Maximum Charging Current	15.97 A	12.88 A	14.97 A
Charging Power	Average Charging Wage	60.03 W	24.96 W	37.53 W
	Maximum Charging Wage	254.29 W	321.35 W	377.92 W
	Obtained Power	1440.65 Wh	608.13 Wh	900.84 Wh
Matching Ratio	Obtained power/teoritical power x 100%	32.42 %	30.28 %	88.87 %

Pada hari kedua bilah pinus dapat mengestrak 30.28% dari energi angin sebesar 608.13 wh dan pengisian daya maksimum 321.35 W dengan rata-rata pengisian daya sebesar 24.96 W, fenomena yang meneraik terjadi pada hari ke tiga pengujian dengan kecepatan angin rata-rata 1.94 m/s bilah pinus dapat mengestrak 88.87% dari energi angin yang tersedia dengan pengisian daya maksimum sebesar 377.92 W dengan rata-rata daya pengisian sebesar 37.53 W. Berikut adalah grafik hasil sebaran kecepatan angin dan grafik daya bilah pinus seperti yang tersaji pada Gambar 4.15 - 4.20





Gambar 4.15 Sebaran kecepatan angin yang terjadi pada tanggal 28-10-2015

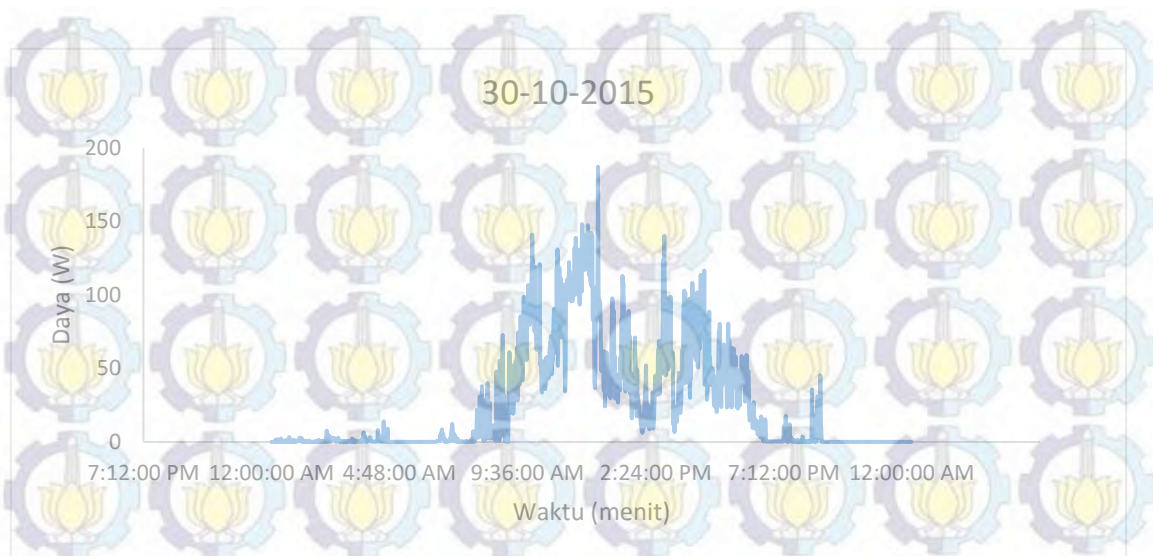


Gambar 4.16 Sebaran Daya yang dihasilkan pada tanggal 28-10-2015

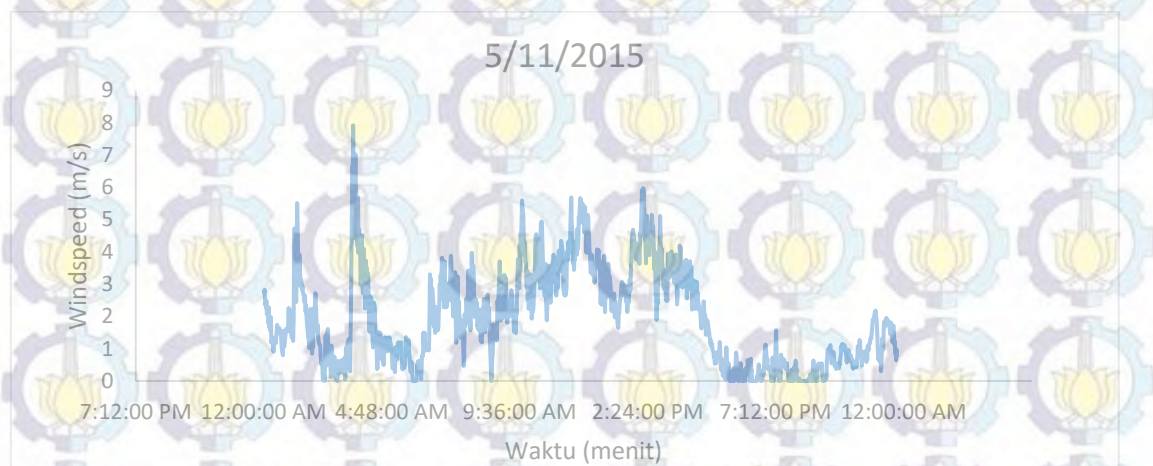


Gambar 4.17 sebaran kecepatan angin yang terjadi pada tanggal 30-10-2015

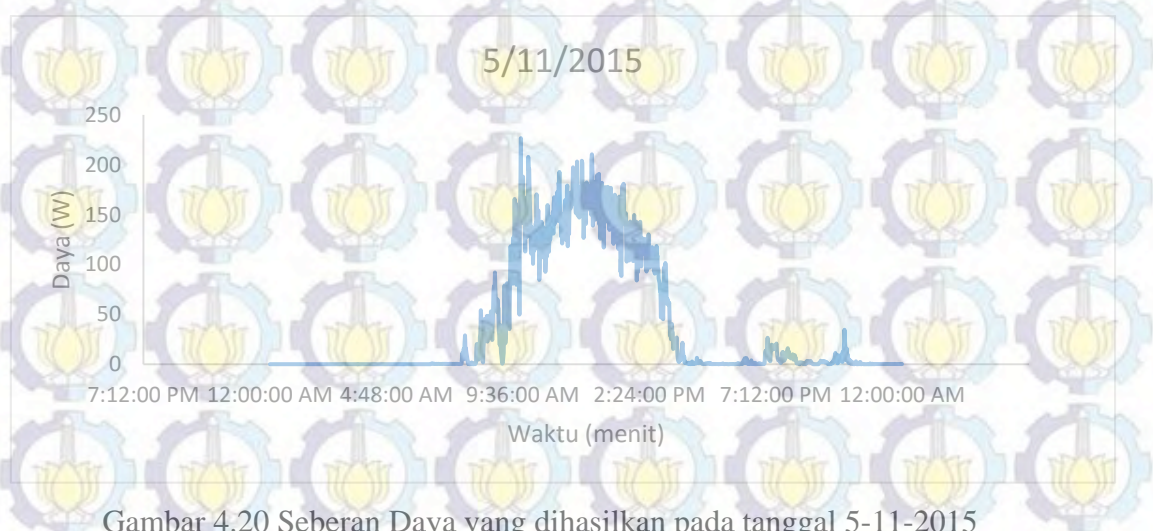




Gambar 4.18 Sebaran Daya yang dihasilkan pada tanggal 30-10-2015



Gambar 4.19 sebaran kecepatan angin yang terjadi pada tanggal 5-11-2015



Gambar 4.20 Sebaran Daya yang dihasilkan pada tanggal 5-11-2015



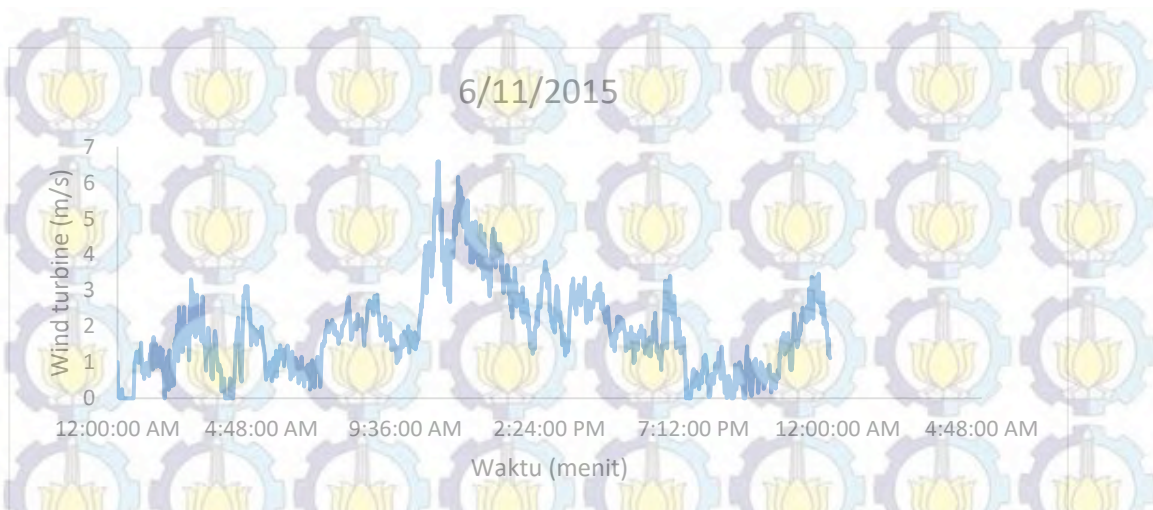
Setelah dilakukan pengujian bilah pinus selanjutnya dilakukan pengujian bilah mahoni, hasil pengujian terangkum pada Tabel 4.3. Kecepatan angin rata-rata pada saat bilah mahoni sedang beroperasi bernilai kurang dari 3 m/s namun memiliki kecepatan maksimum 7.11 m/s kecepatan ini lebih rendah bila dibandingkan dengan kecepatan angin pada saat pengujian bilah pinus hal ini bertepatan dengan perubahan iklim di daerah penelitian sehingga kecepatan angin mengalami penurunan.

Tabel 4.3 Hasil Pengolahan data Bilah mahoni

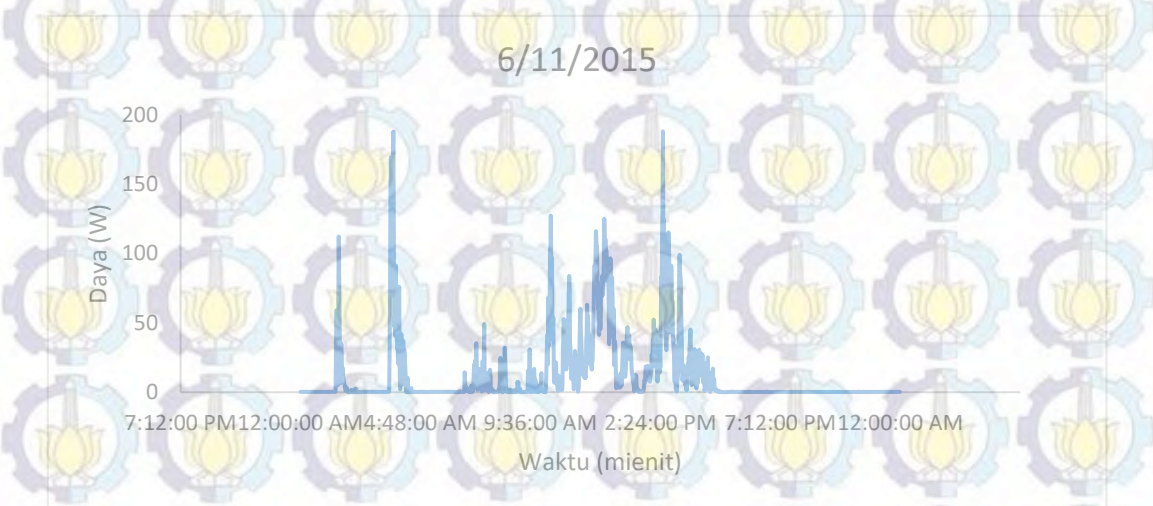
Tanggal		6-11-2015	9-10-2015	10-11-2015
Wind Measurement	Average Wind Speed	1.88 m/s	2.38 m/s	2.17 m/s
	Maximum Wind Speed	7.11 m/s	6.78 m/s	6.47 m/s
	Dominant Wind Direction			
	Teoritical Power	796.29 Wh	1477.75 Wh	1152.33 Wh
Charging Measurement	Maximum Battery Voltage	25.49 Volt	25.67 Volt	25.50 Volt
	Minimum Battery Voltage	23.67 Volt	24.22 Volt	24.01 Volt
	Maximum Charging Current	13.82 A	6.65 A	10.22 A
Charging Power	Average Charging Wage	12.27 W	9.10 W	17.21 W
	Maximum Charging Wage	345.50 W	170.58 W	253.26 W
	Obtained Power	294.40 Wh	218 Wh	412.95 Wh
Matching Ratio		36.97%	14.78%	35.84%

Pada hari pertama pengujian bilah mahoni dapat mengestrak 36.97% dari energi angin sebesar 294.40 wh dengan rata-rata pengisian daya 12.27 W dan memiliki pengisian daya maksimum 345.50 W, Pada hari kedua bilah mahoni hanya dapat mengestrak 14.78% dari energi angin sebesar 218 wh dan pengisian daya maksimum 170.58 W dengan rata-rata pengisian daya sebesar 9.10 W hal ini disebabkan bilah kehilangan kesetimbanganya sehingga menyebabkan penurunan performa. Pada hari ke tiga bilah mahoni dapat mengestrak 35.84 % dari energi angin yang tersedia dengan pengisian daya maksimum sebesar 253.26 W dengan rata-rata daya pengisian sebesar 17.21 W. Berikut adalah grafik hasil sebaran kecepatan angin dan grafik daya bilah pinus seperti yang tersaji pada Gambar 4.21-4.26

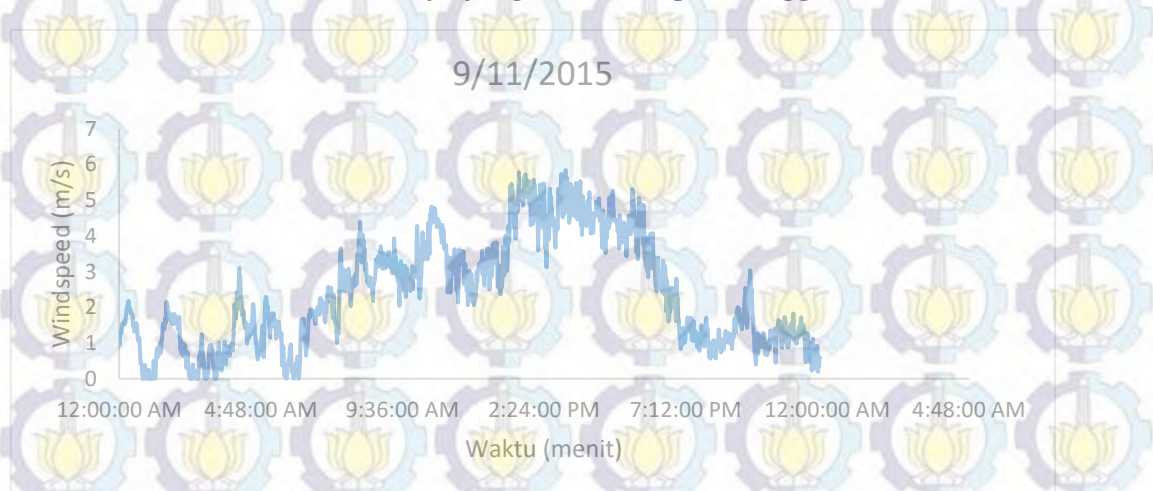




Gambar 4.21 Sebaran kecepatan angin yang terjadi pada tanggal 6-11-2015

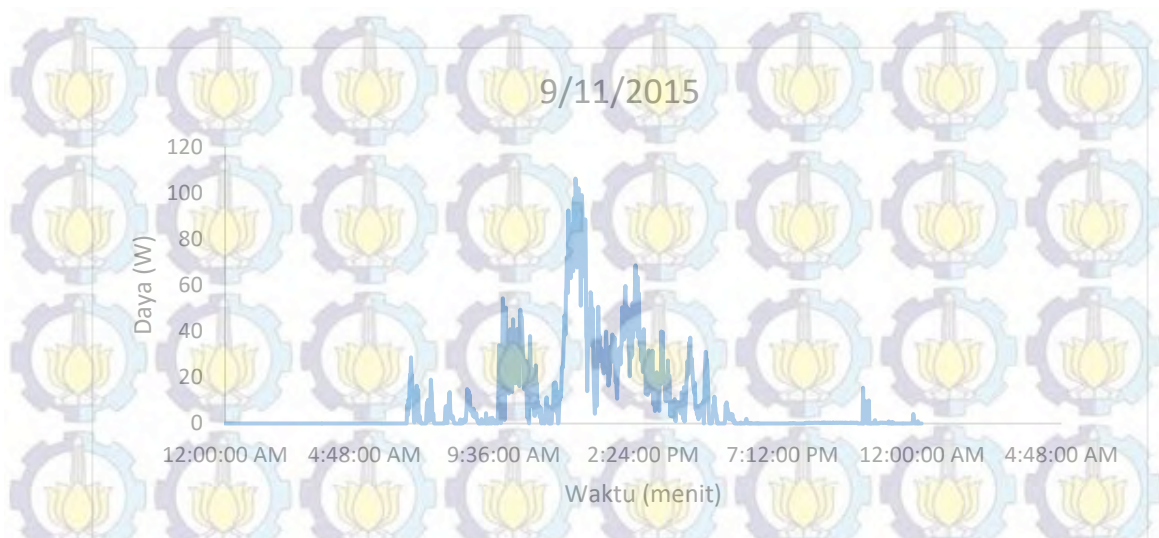


Gambar 4.22 Sebaran Daya yang dihasilkan pada tanggal 6-11-2015

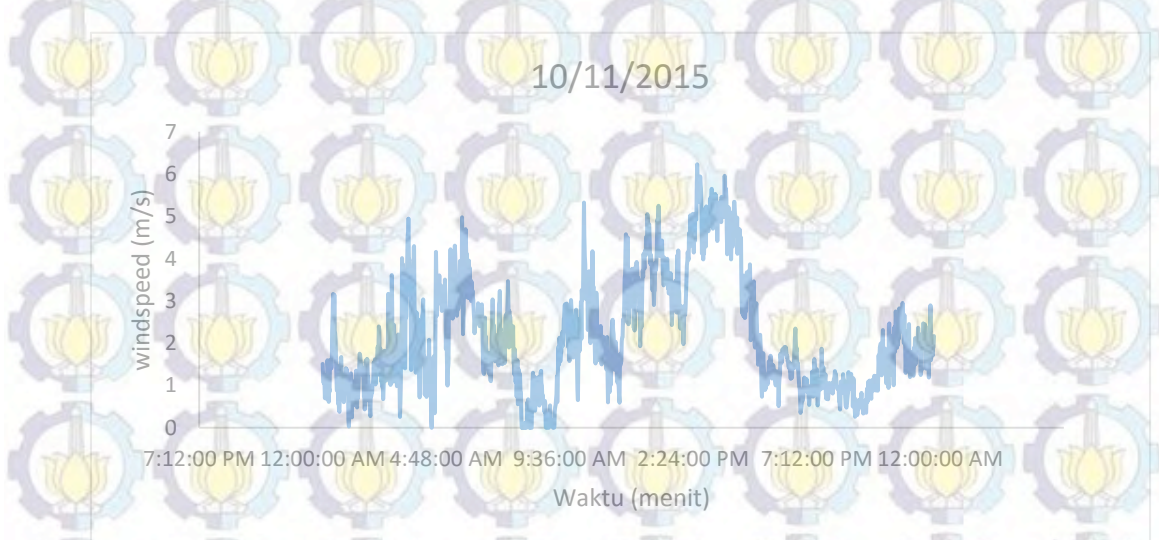


Gambar 4.23 sebaran kecepatan angin yang terjadi pada tanggal 9-11-2015





Gambar 4.24 Sebaran Daya yang dihasilkan pada tanggal 9-11-2015



Gambar 4.25 sebaran kecepatan angin yang terjadi pada tanggal 10-11-2015



Gambar 4.26 Sebaran Daya yang dihasilkan pada tanggal 10-11-2015



Dari Tabel 4.2 dan Tabel 4.3 kecepatan angin rata-rata bernilai 2 m/s - 3 m/s, kita tidak dapat berpatokan pada kecepatan angin rata-rata suatu daerah untuk menentukan potensi energi angin daerah tersebut dan perlu dilakukan studi-studi awal untuk melihat potensi suatu daerah, menurut Akbar Rahman (2012) dalam penelitiannya mengatakan bahwa kecepatan angin per provinsi di seluruh Indonesia dari tahun 2000 - 2007 memiliki kecepatan rata-rata 2 m/s hingga 3 m/s, sehingga dapat dikatakan Indonesia memiliki potensi Energi Angin di setiap provinsi yang perlu di kaji dan dimanfaatkan untuk daerah-daerah tersebut.

Energi yang disimpan kedalam baterai baru dapat digunakan bila baterai bertegangan  $\pm 25$  V, secara keseluruhan tegangan yang dihasilkan bilah pinus dan mahoni dapat mengestrak energi angin  $\pm 30\%$  dari energi yang tersedia. Pembuatan Bilah telah sesuai dengan teori Tabel 1. Dimana efisiensi sistem kincir angin sebesar 30% dan pada pengujian kedua jenis bilah memiliki efisiensi  $\pm 30\%$ .



## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Simulasi airfoil NACA 4412 dan airfoil NACA 4415 yang telah dilakukan memberikan kesimpulan bahwa NACA 4412 lebih baik bila dibandingkan dengan NACA 4415 dilihat dari simulasi TSR -  $C_p$ , pada TSR 7 NACA 4412 untuk kedua jenis bilah memiliki  $C_p$  rata-rata 50% sedangkan untuk NACA 4415 memiliki nilai  $C_p$  34%. Sementara itu pengujian daya pada kecepatan angin 12 m/s memberikan hasil NACA 4412 untuk kedua jenis bilah mempunyai daya diatas 1kW sedangkan untuk jenis NACA 4415 memiliki daya dibawah 0.8 kW, Jenis bilah taperless lebih baik dibandingkan dengan jenis taper terlihat pada hasil pengujian TSR –  $C_p$  taperless memiliki nilai  $C_p$  52% sementara taper bernilai 50%. Untuk pengujian daya, saat nilai TSR 7 dan kecepatan angin 12 m/s *taperless* menghasilkan daya sebesar 1549.88 W dan *taper* memiliki daya 1235.31 W

Hasil pengujian ketahanan untuk kayu Mahoni terjadi keretakan pada salah satu bilah sedangkan untuk kayu pinus tidak terjadi keretakan pada semua bilah. Selanjutnya untuk pengujian daya bilah kayu mahoni memiliki Matching Ratio berturut-turut untuk hari pertama, kedua dan ketiga adalah sebesar 32.42, 30.28 dan 88.87%. Sementara itu, untuk kayu mahoni menghasilkan Matching Ratio untuk hari pertama, kedua dan ketiga berturut-turut sebesar 36.97, 14.78 dan 35.84%.

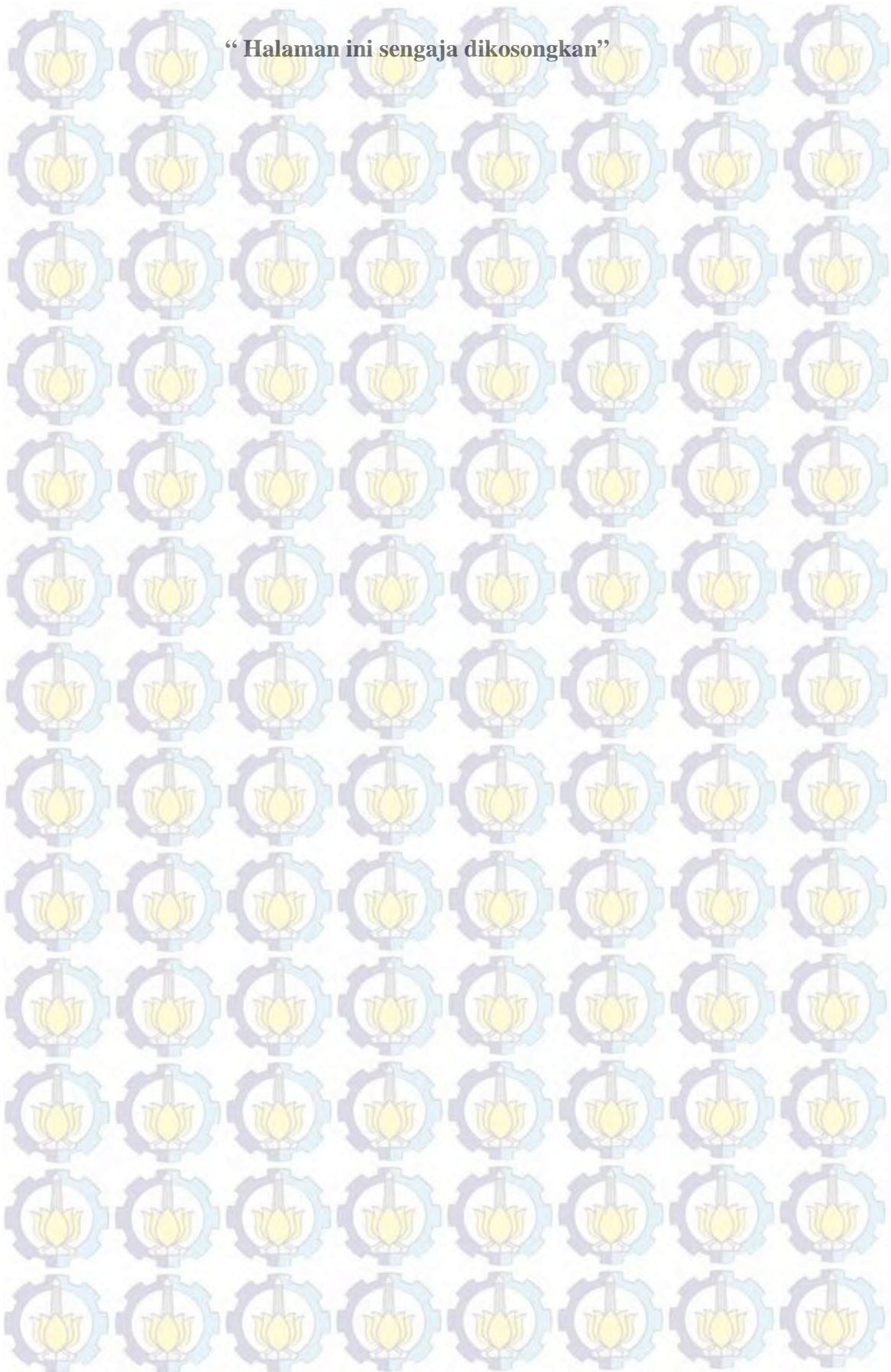
#### 5.2 Saran

Penelitian ini perlu dikembangkan lebih lanjut untuk memperoleh hasil yang lebih spesifik. Adapun saran-saran yang yang perlu untuk pengembangan penelitian ini yaitu:

1. Peningkatan efisiensi sistem kincir angin pada waktu perancangan agar efisiensi bilah yang telah jadi mampu mengstrak energi angin lebih baik lagi
2. Proses kesetimbangan sebaiknya dilakukan selama proses pembuatan agar tidak mengalami kesulitan kelak ketika dilakukan pemasangan bilah.



“ Halaman ini sengaja dikosongkan”





## DAFTAR PUSTAKA

Abdurahim Martawijaya, Iding Kartaujana, Kosasi Kadir, Soewanda Amnon Prawira (2005), "*Atlas Kayu Indonesia Jilid 1*", DEPARTEMEN KEHUTANAN BADAN PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN KEHUTANAN, BOGOR

Akbar Rachman, (2012), *analisis dan pemetaan potensi energ angin di indonesia*, FT UI. Depok

Arinana dan Farah Diba (2009), "*Kualitas Kayu Pulai ('Alstonia scholaris' ) Terdensifikasi (Sifat Fisis, Mekanis dan Keawetan)*", Jurnal Ilmu dan Teknologi Hasil Hutan 2(2): 78-88 (2009).

Budianto, A.D (1996). "*sistem pengeringan kayu*". Penerbit kanisius. Jakarta

Contained energi indonesia (2011), "*Energi Yang Terbarukan*", PNPM Mandiri

Dalimi (2001), "*Energy Outlook & Statistics*", Universitas Indonesia

Dines Ginting (2010), "*Rencana Awal dan Analisis Bentuk Sudu Turbin Angin 50 kW*", Jurnal Teknologi Dirgantara Vol. 8 No 2 Desember 2010:136-143

Emrah Kulunk (2011), "*Aerodynamics of Wind Turbine*", New Mexico Institute of Mining and Technology USA, July 5, 2011 under CC BY-NC-SA 3.0

Erich Hau, 2005, "*Wind Turbines : Fundamentals, Technologies, Application, Economic 2<sup>nd</sup> edition*", Springer.

Hansen, Martin O.L., *Aerodynamics of Wind Turbines*, 2nd ed., Earthscan in the UK and USA, 2008, Chaps, 1 -10.

Hasyim Asy'ari<sup>1</sup>, Aris Budiman<sup>2</sup>, Wahyu Setiyawan , "*Desain Prototipe Pembangkit Listrik Tenaga Angin Dengan Turbine Horizontal Dan Generator Magnet Permanen Tipe Axial Kecepatan Rendah*" Prosiding Seminar Nasional Aplikasi Sains & Teknologi (SNAST) Periode III, Yogyakarta, 3 November 2012.

Piggot, H. (2000), "*WindPower Workshop*". Peninsula : British Wind Energy Association.

J. F. Dumanou, (2001), "*Mengenal Kayu*", Penerbit Kanisius, Yogyakarta.



John Stefford dan Guy Mc Murdo : 1989, "*Teknologi Kerja Kayu*", Erlangga, Jakarta

J. Yen and N. A. Ahmed, "Enhancing vertical axis wind turbine by dynamic stall control using synthetic jets," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 114, pp. 12–17, Mar. 2013.

Karthikeyan N. Karthikeyan a, K. Kalidasa Murugavel a,n, S. Arun Kumar a, S. Rajakumar (2014),"Review of aerodynamic developments on s mall horizontal axis wind trubine blade",*Renewable and Sus tainable Energy Reviews* 42 (2015) 801 –822

M. Ragheb, 2014. "*Aerodinamic of Rotor Blades*".

Marten D (2014), "*Qblade Short Manual v0.8*", QBlade@outlook.com TU Berlin

Marten D (2015), "*Qblade v0.9 Guidelines*", QBlade@outlook.com TU Berlin

Nurwati Hadjib, "*Daur Teknis Pinus Tanaman Untuk Kayu Pertukangan Berdasar Sifat fisis dan Mekanis* ",*Jurnal Penelitian Hasil Hutan* Volume 27 , Nomor 1 Tahun 2009

N. Tenguria, N. D. Mittal, and S. Ahmed, Evaluation Of Performance Of Horizontal Axis Wind Turbine Baling-balings Based On Optimal Rotor Theory, *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 2011. Vol.5, No.1, p.15-23.

Peter J. Schubel and Richard J. Crossley, "*Wind Turbine Blade Design*", *Energies* 2012, 5, 3425-3449; doi:10.3390/en5093425, 6 September 2012.

Rand, Joseph. 2010. KidWind Project: *Wind Turbine Blade Design*. s.l. : National Wind Technology Center, 2010.

Sudarsono (2013), "*Optimasi Rancangan Kincir Angin Modifikasi Standar NACA 4415 Menggunakan Serat Rami (Boehmeria Nivea) Dengan Core Kayu Sengon Laut (Albizia Falcata) Yang berkelanjutan*", Disertasi Pprogram Doctor Ilmu Lingkungan Universitas Diponogoro, Semarang.

Situs: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca4412-il> (Diakses 12-04-2015).

Situs: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca4415-il> (Diakses 12-04-2015).



T. Al-Shemmeri (2010), "*Wind Turbines*", T Al-shemmeri and Ventus Publisging  
Aps ISBN 978-87-7681-692-6

Tim LAN (2014), "*Pengenalan Teknologi Pemanfaatan Energi Angin*", Lentera  
Angin Nusantara (Tidak dipublikasikan).

Tim LAN (2015), "*Tutorial Menggambar Desain Blade Taperless 1m*", Lentera  
Angin Nusantara (Tidak dipublikasikan).

Tim LAN (2015), "*Draft Tutorial Bilah-Cofindential*", Lentera Angin Nusantara  
(Tidak dipublikasikan).

Y. Daryanto (2007), "*Kajian Potensi angin Untuk Pembangkit Listrik Tenaga  
Bayu*", BALAI PPTAGG – UPT-LAGG, Yogyakarta.



## Lampiran 1. Geometri Awal Bilah

Tabel 1. Geometri Bilah NACA 4412 Tapper.

Elemen	$r$ (m)	TSR Parsial	<i>Flow Angel</i> ( $\phi$ )	Twist ( $\beta$ )	Chord (m)	<i>Twist</i> ( $^\circ$ )
1	0.096	0.67	37.42	31.42	0.097	13.51
2	0.181	1.27	25.53	19.53	0.09	12.45
3	0.266	1.86	18.84	12.84	0.083	11.39
4	0.351	2.46	14.77	8.77	0.076	10.34
5	0.436	3.05	12.10	6.10	0.70	9.28
6	0.521	3.65	10.23	4.23	0.063	8.22
7	0.606	4.24	8.85	2.85	0.056	7.17
8	0.691	4.84	7.79	1.79	0.049	6.11
9	0.776	5.43	6.96	0.96	0.042	5.06
10	0.861	6.03	6.28	0.28	0.036	4.00

Tabel 2. Geometri Bilah NACA 4412 Tapperless.

Elemen	$r$ (m)	TSR Parsial	<i>Flow Angel</i> ( $\phi$ )	<i>Twist</i> ( $\beta$ )	<i>Chord</i> (m)	<i>Twist</i> ( $^\circ$ )
1.00	0.10	0.67	37.42	31.42	0.097	13.51
2.00	0.18	1.27	25.53	19.53	0.097	12.45
3.00	0.27	1.86	18.84	12.84	0.097	11.39
4.00	0.35	2.46	14.77	8.77	0.097	10.34
5.00	0.44	3.05	12.10	6.10	0.097	9.28
6.00	0.52	3.65	10.23	4.23	0.097	8.22
7.00	0.61	4.24	8.85	2.85	0.097	7.17
8.00	0.69	4.84	7.79	1.79	0.097	6.11
9.00	0.78	5.43	6.96	0.96	0.097	5.06
10.00	0.86	6.03	6.28	0.28	0.097	4.00



## Lampiran 1. Lanjutan

Tabel 4.4 Geometri Bilah NACA 4415 Tapper.

Elemen	r (m)	TSR Parsial	Flow Angel ( $\phi$ )	Twist ( $\beta$ )	Chord (m)	Twist ( $^{\circ}$ )
1	0.1	0.67	37.42	30.92	0.093	13.82
2	0.18	1.27	25.53	19.03	0.086	12.73
3	0.27	1.86	18.84	12.34	0.08	11.64
4	0.35	2.46	14.77	8.27	0.073	10.55
5	0.44	3.05	12.1	5.6	0.067	9.46
6	0.52	3.65	10.23	3.73	0.06	8.37
7	0.61	4.24	8.85	2.35	0.053	7.27
8	0.69	4.84	7.79	1.29	0.047	6.18
9	0.78	5.43	6.96	0.46	0.04	5.09
10	0.86	6.03	6.28	-0.22	0.034	4

Tabel 4.5 Geometri Bilah NACA 4415 Tapperless.

Elemen	r (m)	TSR Parsial	Flow Angel ( $\phi$ )	Twist ( $\beta$ )	Chord (m)	Twist ( $^{\circ}$ )
1	0.1	0.67	37.42	30.92	0.093	13.82
2	0.18	1.27	25.53	19.03	0.093	12.73
3	0.27	1.86	18.84	12.34	0.093	11.64
4	0.35	2.46	14.77	8.27	0.093	10.55
5	0.44	3.05	12.1	5.6	0.093	9.46
6	0.52	3.65	10.23	3.73	0.093	8.37
7	0.61	4.24	8.85	2.35	0.093	7.27
8	0.69	4.84	7.79	1.29	0.093	6.18
9	0.78	5.43	6.96	0.46	0.093	5.09
10	0.86	6.03	6.28	-0.22	0.093	4



## Lampiran 2. Tabel Nilai Simulasi TSR dan Cp

Tabel 2. Nilai TSR (*Tip Speed Ratio*) dan Cp (*Coefficient Power*)

4412				4415			
taper		Taperless		taper		taperless	
TSR	Cp	TSR	Cp	TSR	Cp	TSR	Cp
1.00	0.02	1.00	0.04	1.00	0.01	1.00	0.01
1.50	0.04	1.50	0.07	1.50	0.02	1.50	0.03
2.00	0.06	2.00	0.14	2.00	0.03	2.00	0.05
2.50	0.13	2.50	0.26	2.50	0.05	2.50	0.09
3.00	0.21	3.00	0.37	3.00	0.08	3.00	0.14
3.50	0.30	3.50	0.44	3.50	0.11	3.50	0.18
4.00	0.37	4.00	0.48	4.00	0.13	4.00	0.22
4.50	0.42	4.50	0.51	4.50	0.16	4.50	0.25
5.00	0.46	5.00	0.52	5.00	0.18	5.00	0.28
5.50	0.49	5.50	0.52	5.50	0.19	5.50	0.30
6.00	0.50	6.00	0.52	6.00	0.21	6.00	0.32
6.50	0.50	6.50	0.52	6.50	0.22	6.50	0.33
7.00	0.50	7.00	0.52	7.00	0.23	7.00	0.34



### Lampiran 3. Tabel Nilai Simulasi Performance Bilah

Tabel 3. Performa Bilah secara simulasi

4412				4415			
Taper		Taperless		Taper		Taperless	
V (m/s)	P (W)	V (m/s)	P (W)	V (m/s)	P (W)	V (m/s)	P (W)
1	0	1	0	1	0	1	0
1.5	0	1.5	0	1.5	0	1.5	0
2	0	2	0	2	0	2	0
2.5	0	2.5	0	2.5	0	2.5	0
3	0	3	0	3	1.77787	3	0
3.5	0	3.5	0	3.5	11.0793	3.5	8.78076
4	16.5196	4	0	4	23.1349	4	26.8813
4.5	45.2076	4.5	16.5201	4.5	38.1011	4.5	48.3582
5	79.7477	5	51.9102	5	56.0755	5	76.9523
5.5	123.342	5.5	92.4421	5.5	75.0979	5.5	106.199
6	176.358	6	144.28	6	95.8956	6	138.473
6.5	236.141	6.5	211.32	6.5	119.269	6.5	173.879
7	303.293	7	293.943	7	146.603	7	213.653
7.5	386.058	7.5	380.977	7.5	173.978	7.5	259.398
8	470.427	8	474.947	8	201.927	8	305.933
8.5	556.862	8.5	577.886	8.5	231.521	8.5	353.593
9	650.327	9	688.409	9	262.537	9	404.548
9.5	746.229	9.5	811.565	9.5	294.409	9.5	457.682
10	844.414	10	944.158	10	326.968	10	513.145
10.5	944.379	10.5	1084.35	10.5	359.428	10.5	569.874
11	1044.64	11	1234.16	11	391.512	11	627.546
11.5	1143.39	11.5	1390.95	11.5	422.964	11.5	685.186
12	1240.29	12	1554.28	12	453.504	12	742.38



#### Lampiran 4. Gambar Proses Pembuatan Bilah



Gambar 1. Proses Pembuatan Bilah Menggunakan mesin CNC



**Lampiran 5. Gambar Proses Pengeboran Bilah**



**Gambar 2. Proses Pengeboran**



**Lampiran 6. Gambar Persiapan Pemasangan Generator, Fin dan Bilah**



**Gambar 3 Proses Pemasangan Generator,Fin dan Bilah**



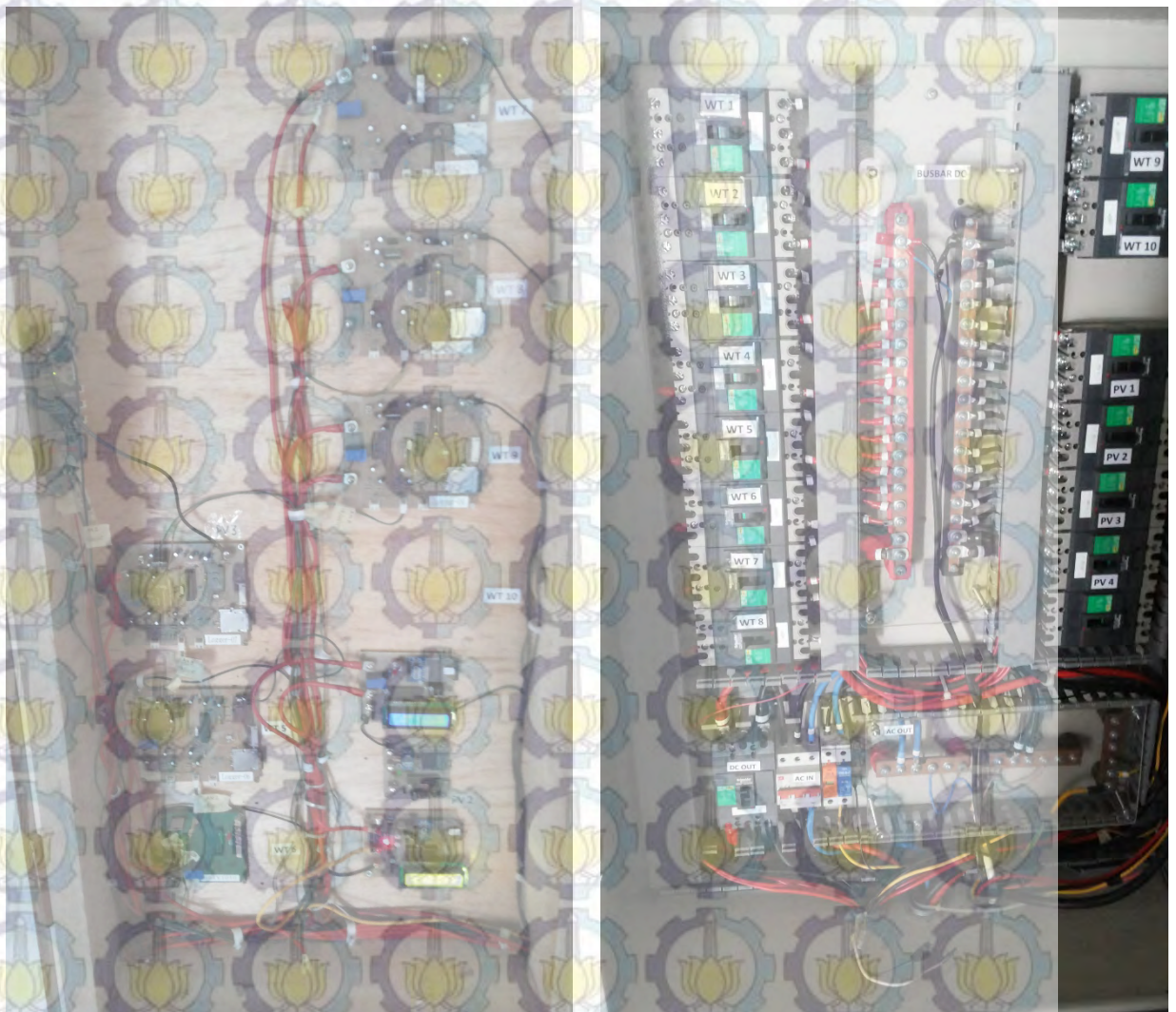
**Lampiran 7. Gambar Persiapan Pergantian Bilah**



**Gambar 4. Proses Pergantian Bilah**



## Lampiran 8. Gambar Peralatan Elektronik Kincir Angin LAN





## Lampiran 8. Lanjutan



Gambar 5. Peralatan Elektronik Kincir Angin Lentera Angin Nusantara (LAN)



## BIOGRAFI PENULIS



Burhannudin Dahlan dilahirkan di Nabire, 20 Desember 1989 dan merupakan anak kelima dari enam bersaudara. Penulis memulai pendidikan di MI Nurul Ilmi (1995-2001), dilanjutkan di SMP Negeri 02 Nabire (2001-2004), Lalu menuntutu

Ilmu di SMA Muhammadiyah Nabire (2004-2007). Melanjutkan studi S1 jurusan Fisika FMIPA di Universitas Negeri Papua Manokwari (2007-2012).

Selama menempuh S1 penulis aktif menjadi asisten praktikum Fisika Dasar dan kepengurusan HMJ dan melanjutkan studi Pra S2 dan S2 di jurusan Fisika FMIPA ITS.